

[illegible]

„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ  
КАФЕДРА ПРОМИСЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

До захисту допущено  
Завідувач кафедри

Ю.С. Ямненко

(підпис)

(ініціали, прізвище)

„\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2019р.

## Дипломний проект на здобуття ступеня бакалавра

з напрямку підготовки 6.050802 Електронні пристрої та системи  
(код та назва напрямку підготовки або спеціальності)

на тему Інвертор напруги з плаваючими конденсаторами  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Виконав: студент 4 курсу, групи ДС-51

Володін Олександр Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник ст. викладач Заграничний А. В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультанти:

(назва розділу)

(вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент проф. Писаренко Л.Д.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає  
запозичень з праць інших авторів без відповідних  
посилань

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2019 року

## АНОТАЦІЯ

На сьогоднішній день є актуальною розробка каротажних пристроїв для дослідження пластів земної кори. Метод каротажу використовує у роботі високочастотні зондуючі імпульси, для формування яких доцільно використовувати пристрої з ключовим принципом роботи, такі як інвертори. Для покращення якості сигналу необхідно формувати три або більше рівнів напруги.

В роботі наведені різновиди багаторівневих інверторів, їх переваги та недоліки та принцип роботи. Розроблена структурна схема каротажного пристрою, на основі якої розроблено електричні принципові схеми трирівневого та п'ятирівневого інвертора з плаваючими конденсаторами, та системи керування для них. Створена комп'ютерна модель у середовищі Matlab Simulink та проведений аналіз впливу зміни ємності та опору в навантаженні на роботу схем.

## ABSTRACT

To date, the development of logging devices for the study of earth crust is relevant. The logging method uses high-frequency probing impulses in the work, for the formation of which it is advisable to use devices with a key principle of operation, such as inverters. To improve the signal quality, three or more voltage levels must be formed.

Varieties of multi-level inverters, their advantages and disadvantages and the principle of work are given in the work. The structural scheme of the logging device is developed, on the basis of which the electric principle schemes of the three-level and five-level inverter with floating capacitors are developed, and the control system for them. A computer model has been created in the Matlab Simulink series and an analysis of the effect of changing capacitance and resistance in the workload of the schemes has been carried out.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1.БАГАТОРІВНЕВІ ІНВЕРТОРИ НАПРУГИ.....	5
1.1.Різновиди багаторівневих інверторів напруги .....	5
1.2. Система керування багаторівневого інвертора.....	11
1.3. Використання багаторівневого інвертора в каротажному пристрої на основі ЯМР.....	13
2. РОЗРОБКА ЗОНДУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ .....	16
2.1. Проектування структурної схеми багаторівневого інвертора .....	16
2.2. Розробка схеми електричної принципової .....	17
3. МОДЕЛЮВАННЯ В СЕРЕДОВИЩІ SIMULINK .....	29
3.1. Створення моделей зондувального пристрою в середовищі Simulink.....	29
3.2. Моделювання системи керування трьохрівневого інвертора .....	34
3.3. Моделювання системи керування п'ятирівневого інвертора .....	36
3.4. Вплив активного опору навантаження на роботу зондувального пристрою.....	38
ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	48
ABSTRACT	

## ВСТУП

На сьогоднішній день є актуальним використання інверторів для передачі електроенергії, частотного регулювання обертів електродвигуна, систем сонячних батарей та вітрогенераторів, тощо. Оскільки дворівневі інвертори базуються на напівпровідних ключах, то виникає проблема їх використання з високовольтними системами, адже в них обмежений максимально допустимий рівень напруги. Для вирішення цієї проблеми використовуються багаторівневі інвертори, котрі здатні формувати три і більше рівні напруги, для отримання якісного гармонічного сигналу з великою амплітудою. Це рішення використовують Siemens, ABB, Simovert, для перетворювачів частоти, також General Electric, Mitsubishi Electric, Robicon в області електроприводів та вітроенергетиці. Дані інвертори використовують бюджетні IGBT транзистори в якості ключових елементів. Для керування такими інверторами використовується широтно - імпульсна модуляція, за допомогою якої здійснюється комбінація відмикання ключів для отримання необхідного сигналу. Також однією з областей використання багаторівневих інверторів є дослідження пластів земної кори за допомогою методу каротажу на основі ядерного магнітного резонансу.

З використанням багаторівневих інверторів виникають складності в області балансу активного навантаження, оптимізації системи керування та раціонального вибору кількості рівнів напруги відносно типу топології, що потребує дослідження та аналізу.

					ДС51.510.403.001ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

# 1.БАГАТОРІВНЕВІ ІНВЕРТОРИ НАПРУГИ

## 1.1.Різновиди багаторівневих інверторів напруги

Інвертор – це генератор періодичної напруги, при цьому форма напруги може бути синусоїдальною, наближеною до синусоїдальної або імпульсною. Зазвичай, інвертор перетворює постійну напругу однієї величини в змінну напругу іншої величини. В перетворювальній техніці інвертор перетворює напругу, шляхом її трансформації на високій частоті (десятки або сотні кілогерц). Інвертор складається з напівпровідникових ключів, що керуються контролером та мають зазвичай зворотні шунтуючі діоди. Напруга на виході інвертора керується зміною тривалості імпульса керування. В простому випадку це зміна ширини імпульсу ШІМ.

Перші інвертори були виключно механічними. Принцип їх роботи полягав в тому, що механізм, наприклад двигун, перемикав контакти, змінюючи полярність ввімкнення постійного струму, тим самим формуючи декілька рівнів напруги. Сьогодні існує безліч схем інверторів на напівпровідникових ключах, та три типових схеми:

- мостова без трансформатора;
- двухтактна з нульовим виводом;
- мостова з трансформатором.

Створений інвертором прямокутний сигнал (рис. 1.1), надалі згладжується НЧ-фільтром та на виході формується синусоїдальна напруга.

На практиці може виникнути задача отримати високу гармонічну напругу, з синусоїдою наближеною до ідеальної. В цьому випадку можливостей звичайних дворівневих інверторів не вистачає, із-за чого виникає необхідність створювати більше ніж два рівні напруги. Для цього використовуються багаторівневі інвертори.

Окрім того, що багаторівневі інвертори здатні створювати більше ніж два рівні напруги, їх перевагою на двоохрівневими є можливість використовувати

					ДС51.510.403.001ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

низьковольтні напівпровідникові елементи, наприклад IGBT транзистори, для отримання високого рівня вихідної напруги.

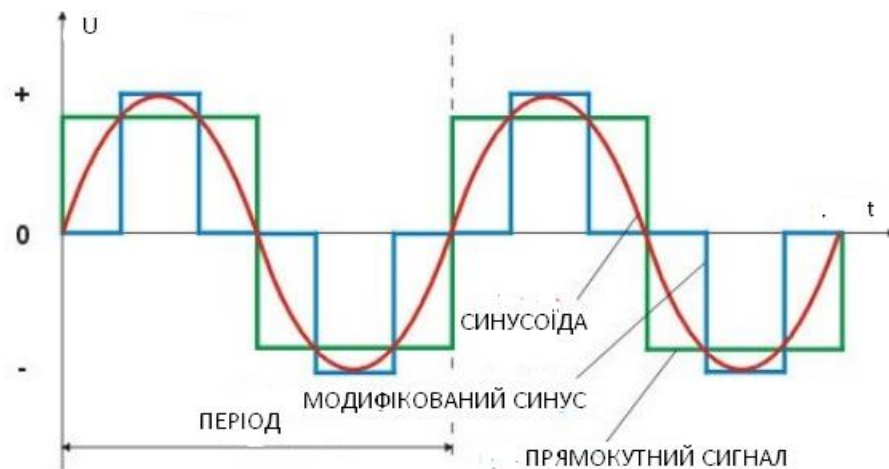


Рис. 1.1 Сигнали створені інвертором в порівнянні з синусоїдою

Основними різновидами багаторівневих інверторів є:

- багаторівневий інвертор з фіксованою нейтральною точкою;
- трьохрівневий інвертор з плаваючими конденсаторами;
- каскадні багаторівневі інвертори.

### Багаторівневий інвертор з фіксованою нейтральною точкою

Найпоширенішими перетворювачами частоти на сьогоднішній день є двох рівневі інвертори, на виході яких формується позитивний рівень напруги  $+V_{dc}$  та негативний рівень напруги  $-V_{dc}$ , де  $V_{dc}$  – це напруга ланки постійного струму. Спроби покращити якість напруги на виході перетворювача привели до створення трьохрівневого перетворювача з фіксованою нейтральною точкою (рис. 1.2). [1] Особливістю даного перетворювача є те, що на вході даного інвертора три потенціали  $+V_{dc}$ ,  $-V_{dc}$  і нейтральний нульовий потенціал (середня точка між послідовно з'єднаними конденсаторами в ланці постійного струму). Різниця напруги між нульовим потенціалом та додатнім або від'ємним складає  $V_{dc}/2$ . Ця напруга через розділюючі діоди подається на середні точки плеч інвертора, сформовані за допомогою послідовно ввімкнених транзисторів. За

					ДС51.510.403.001ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

допомогою певного керування транзисторами на виході формується три рівні напруги  $V_{dc}$ ,  $V_{dc}/2$ , 0. Даний тип інвертора здатен використовувати напівпровідникові ключі більш ефективно, адже вони можуть бути розраховані на меншу номінальну напругу, порівняно з двохрівневим інвертором.

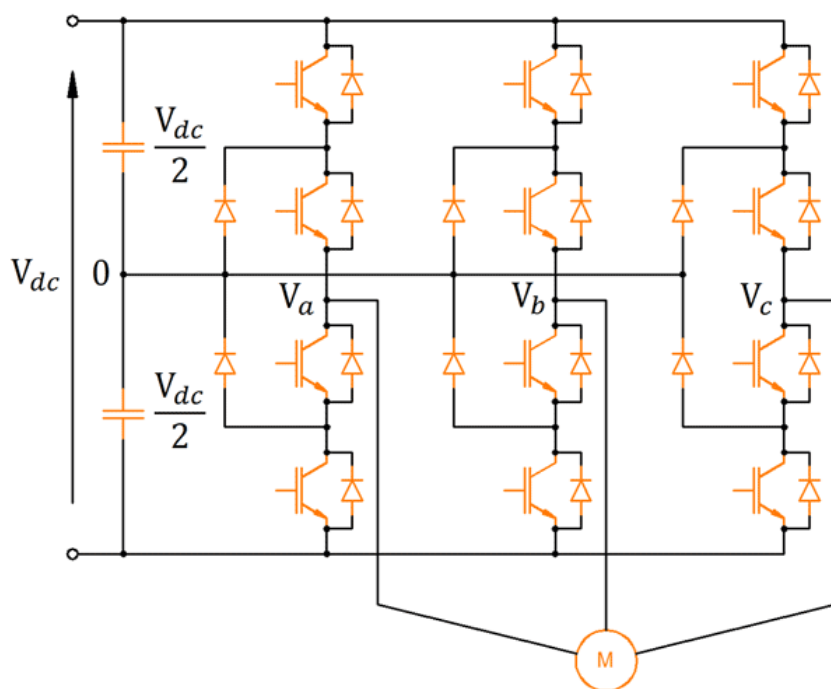


Рис. 1.2 Трифазний трирівневий інвертор з фіксованою нейтральною точкою

Таким чином трирівневий трифазний інвертор складається з дванадцяти IGBT транзисторів(по чотири в кожному плечі інвертора), дванадцяти паралельно з'єднаних зворотних діодів, та шести блокуючих діодів, струм через котрі здатен протікати з нульової лінії в навантаження або навпаки.

В трирівневому інверторі в одному плечі знаходиться чотири ключі, тобто всього 16 можливих комбінацій станів. Допустимими є тільки шість з них,тому що, наприклад, при всіх відкритих ключах буде коротке замикання.

Всі можливі стани ввімкнення ключів наведено у табл. 1.1.

Перевагами такого інвертора є:

- більший КПД, порівняно з двохрівневими інверторами;
- менша кількість неосновних гармонік у вихідному сигналі, що дозволяє зменшити розміри фільтрів;

					ДС51.510.403.001ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



- можливість каскадно збільшувати схему, що дозволяє отримати коефіцієнт синусоїдальності наближений до одиниці.

Таблиця 1.1

VT1	0	0	0	1	0	0
VT2	0	1	0	1	1	0
VT3	0	0	1	0	1	1
VT4	0	0	0	0	0	1

Недоліками такого інвертора є:

- складно контролювати баланс напруги між конденсаторами на шині постійного струму при передачі активної потужності.

### Інвертор з плаваючими конденсаторами

Схема трирівневого інвертора з плаваючими конденсаторами зображена на рис. 1.3. [2] Дана схема на схему з фіксованою нейтральною точкою. Кількість конденсаторів на шині постійного струму рівна  $m-1$ , а кількість транзисторних модулів рівна  $2(m-1)$ , де  $m$  – кількість ступенів в кривій вихідної напруги. Відмінність даної схеми полягає у тому, що замість блокуючих діодів використовуються плаваючі конденсатори. Коли ввімкнений зовнішній транзистор, то конденсатор заряджається до напруги  $V_{dc}/2$ , тобто напруга живлення ділиться навпіл між конденсатором та закритим транзистором, з'єднаним з протилежним полюсом джерела живлення. Таким чином напруга з конденсатора подається на фазу навантаження, або вираховується з напруги джерела живлення, і в обох випадках на фазі навантаження напруга становитиме  $V_{dc}/2$ .

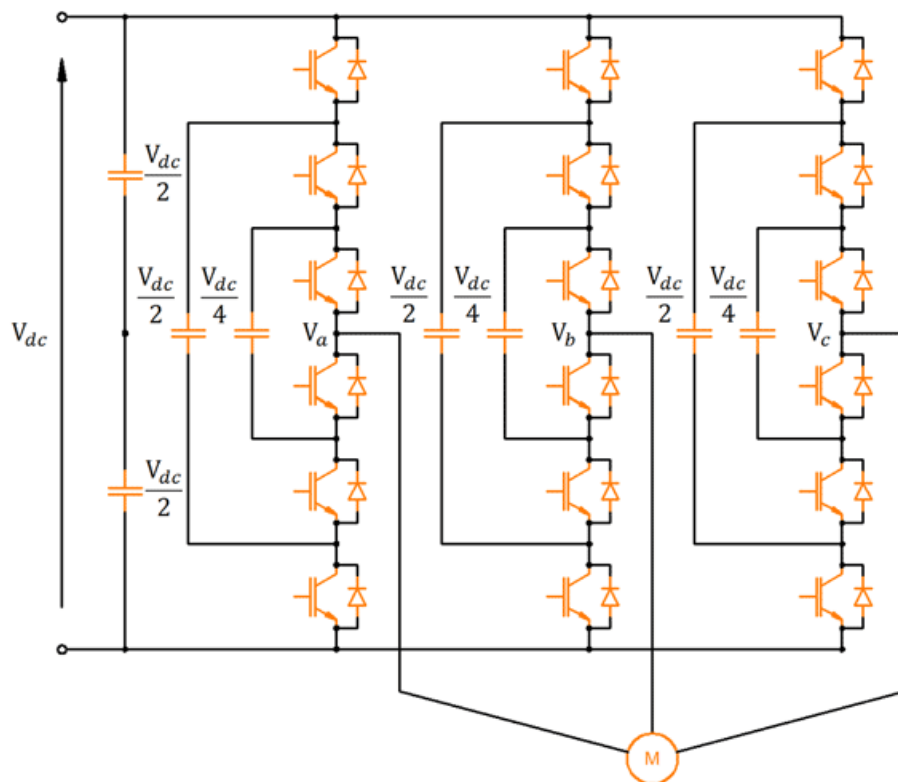


Рис. 1.3 Трифазний інвертор з плаваючими конденсаторами

Перевагами такого інвертора є:

- можливість балансувати напругу між конденсаторами на шині постійного струму при передачі активної потужності;
- можливість працювати з просіданнями мережі живлення, із-за наявності конденсаторів;
- збільшена кількість комбінацій перемикання ключів, адже конденсатори пропускають зворотню напругу, на відміну від зворотніх діодів;
- спільна шина постійного струму дозволяє позбавитися від фазозсувуючого трансформатора.

Недоліками такої схеми є:

- велика кількість конденсаторів, що створює проблему балансування рівня напруг зі збільшенням кількості рівнів вихідної напруги;
- кількість конденсаторів зі збільшенням кількості рівнів напруги зростає квадратично;
- конденсатори, розраховані на велику напругу мають великі габарити.

## Каскадні багаторівневі інвертори

Трирівневий каскадний інвертор складається з послідовно з'єднаних однофазних інверторів в фазі навантаження. [6] Зазвичай, такі схеми є модульними, тобто при виході з ладу одного однофазного інвертора, його можна швидко замінити іншим, що полегшує їх обслуговування. Окрім цього, використовуючи систему керування, можна відключити несправний модуль, не відключаючи навантаження, і продовжити роботу без нього. Така структура здатна створювати високі рівні вихідної напруги, використовуючи лише низьковольтні елементи. На рис. 1.4 зображена схема багаторівневого каскадного інвертора.

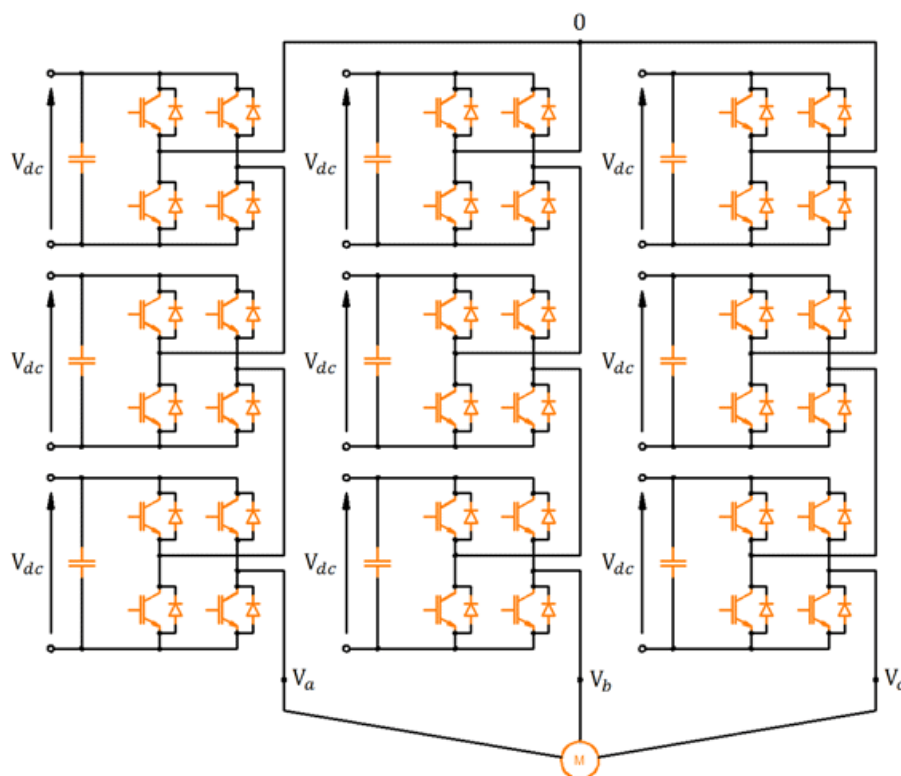


Рис. 1.4 Багаторівневий каскадний інвертор

Ланцюг інвертора складається з чотирьох ключів та чотирьох зворотніх діодів. Відповідно змінюючи стани ключів можна отримати три рівні напруги  $+V_{dc}$ ,  $-V_{dc}$  та  $0$ . Комбінація станів ключів наведена у табл. 1.2.

Таблиця 1.2

$U_{\text{навантаження}}$	VT1	VT2	VT3	VT4
0	1	0	1	0
+U <sub>d</sub>	1	0	0	1
-U <sub>d</sub>	0	1	1	0
0	0	1	0	1

Для отримання багаторівневої форми вихідної напруги, модулі з'єднують послідовно і форма вихідної напруги буде складатися з суми вихідних напруг послідовно з'єднаних інверторів. Кількість рівнів вихідної фазної напруги в каскадному інверторі рахується за формулою:  $M=2s+1$ , де  $s$ —кількість джерел постійної напруги. Багаторівневий каскадного інвертора з Н-мостів зображена на рис.4. В каскадному інверторі кожен модуль має живитися від окремого джерела живлення, для цього використовують спеціальні трансформатори з декількома вторичними обмотками.

Перевагами такого інвертора є:

- відсутня необхідність складного методу регулювання балансу напруги на шинах постійного струму;
- можливість працювати з несправними модулями;
- легка ремонтпригодність, із-за можливості просто замінити модуль, що вийшов з ладу.
- Недоліками такого інвертора є:
- необхідність використовувати багатообмотковий трансформатор, що збільшує вартість приладу.

## 1.2. Система керування багаторівневого інвертора

На сьогоднішній день широкого розповсюдження набули мікроконтролерні системи. Перевага мікроконтролерного керування на відміну від самостійної схеми керування полягає в простоті реалізації та можливості підключення до них багатьох інтерфейсів для удосконалення сигналу керування, таких як UART, SPI, I2C, PWM, тощо. В усіх сучасних мікроконтролерах є

					ДС51.510.403.001ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

виходи для широтно-імпульсної модуляції, з програмною можливістю регулювати скважність та затримку сигналів.

Розглянемо два основних режими ШІМ в мікроконтролері. Перший режим називається Single Slope PWM. [3] Принцип роботи ШІМ в мікроконтролері ґрунтується на внутрішньому таймері, котрий в свою чергу базується на лічильнику. У лічильника є тактовий вхід і з кожним активним перепадом рівня на цьому вході лічильник змінює свій стан. Найтиповіший режим роботи – це збільшення значення лічильника на одиницю з кожним активним тактовим перепадом, доки лічильник не досягне максимального значення. Як тільки це максимальне значення досягнуто, лічильник повертає своє значення до нуля, і процес рахунку імпульсів повторюється. Це дає пилоподібну діаграму відображення значення лічильника (рис. 1.5), так званий односкатний ШІМ (Single Slope PWM). Один повний цикл пили потребує  $\text{Count max} + 1$  тактових імпульсів. На діаграмі Count Max – це максимальне значення лічильника.

Пристрій таймера також має декілька регістрів порівняння. Щоб створити ШІМ сигнал, регістр порівняння зв'язується з апаратним виходом мікроконтролера таким чином, щоб логічне значення на цьому виході було одиниця, доки значення лічильника було рівне або менше значенню регістра порівняння.

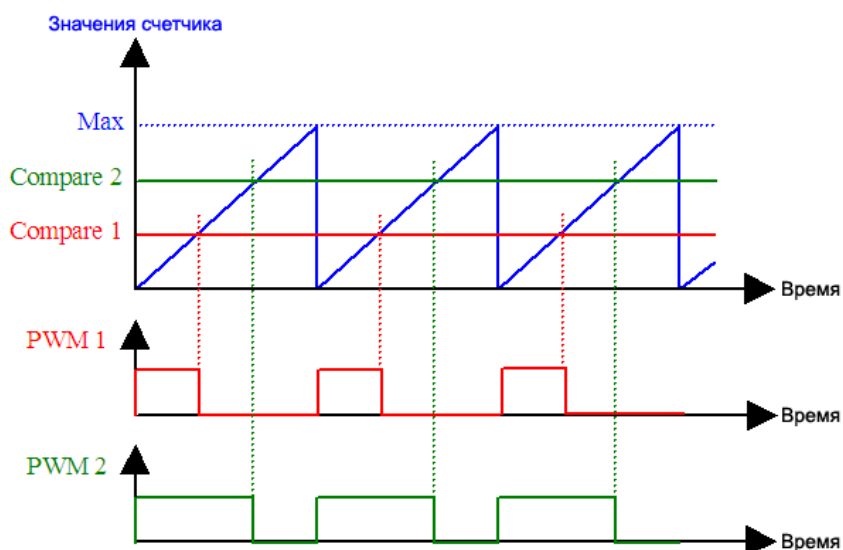


Рис. 1.5 Односкатний режим ШІМ

Інший спосіб формувати ШІМ сигнал називається Dual Slope PWM. Це так званий двухскатний ШІМ. Лічильник в такому випадку збільшується в кожному такті, а коли досягає максимального значення починає зменшуватись на кожному такті, після чого знову починає рахунок на збільшення (рис. 1.6). Це дає трикутну форму діаграми зміни стану лічильника замість пилкоподібної.

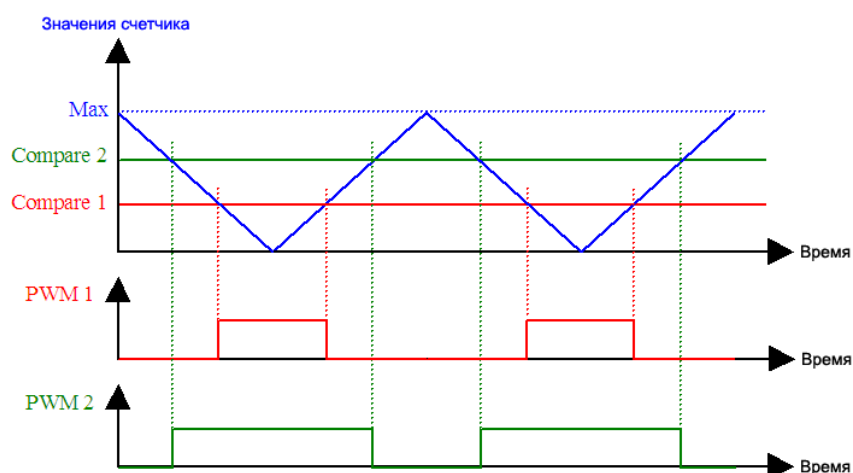


Рис. 1.6 Двухскатний режим ШІМ

Як і в режимі Single slope, використовується регістр порівняння, щоб вихідний сигнал був в логічній одиниці, коли лічильник має значення менше ніж в цьому регістрі. Таким чином ШІМ сигнал формується як в режимі Single slope, проте згенерований сигнал виходить синхронізованим по центру генерованих імпульсів.

Встановлюючи режим ШІМ та встановивши певні довжини імпульсів для відкриття ключів в інверторах, реалізовується керування.

### 1.3. Використання багаторівневого інвертора в каротажному пристрої на основі ЯМР

Каротажний пристрій на основі ядерного магнітного резонансу – це пристрій, що використовує петрофізичні методики для визначення властивостей пластів земної кори в природних умовах. Принцип роботи такого пристрою полягає в наступному: на потужний магніт подається зондувальний сигнал

спеціальної форми після чого створюється змінне магнітне поле, частота якого приблизно дорівнює частоті магнітного резонансу, здатне впливати на спіни атомів водню, переводячи ядерну спінову систему в контрольований нерівноважний стан. В свою чергу спін – це кінетичний момент атома, а оскільки ядро водню це протон, то воно створює електричне коло, що в свою чергу створює магнітне поле. Після зняття впливу магніту на спінову систему починається процес релаксації, тобто повернення спінової системи в початковий стан. В момент релаксації атоми змінюють магнітне поле, що створює своєрідний радіосигнал, котрий здатний зафіксувати каротажний пристрій спеціальною антеною. Після цього сигнал аналізується і створюється графічне зображення зрізів пластів земної кори.

Існують наступні імпульсні радіочастотні послідовності для визначення часу релаксації спінової системи: послідовність Хана, [7] послідовність Карра-Парселла, послідовність Мейбума-Гіла-Карра-Парселла, тощо. Найефективнішою послідовністю є послідовність Карра-Парселла, що базується на послідовності Хана. На спінову систему впливають послідовністю 90-t-180, тобто впливаючи 90 (180) градусним імпульсом вектор намагнічуваності відхиляється на 90 (180) градусів, після чого в момент часу 2t після початку 90 - градусного імпульса створюється спінове відлуння (рис. 2.1).

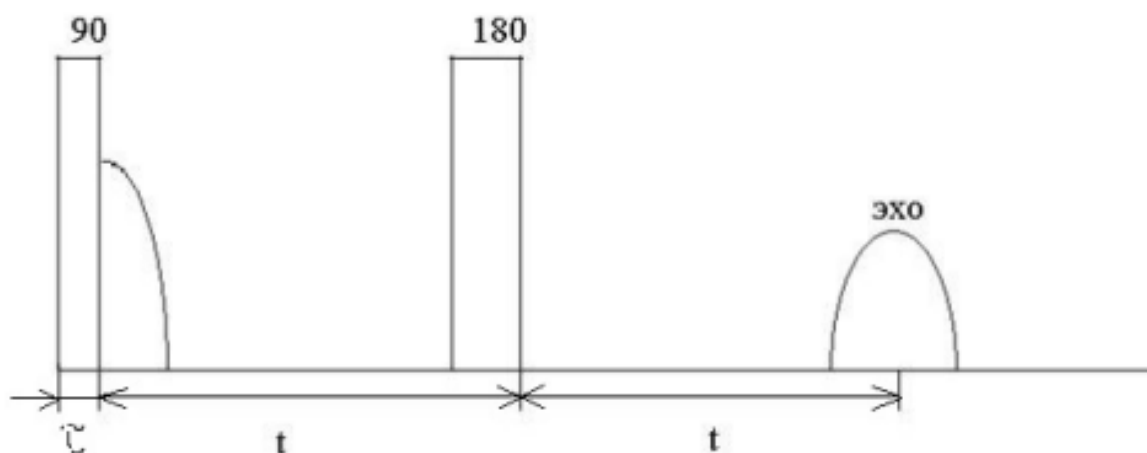


Рис. 2.1 Послідовність Кара-Парселла

Для збільшення якості сигналу застосовується модуляція магнітного поля, тобто замість прямокутного імпульсу використовується сигнал  $s(t)$  (рис. 2.2), який є амплітудно промодельованим за законом  $1+\cos(t)$ .

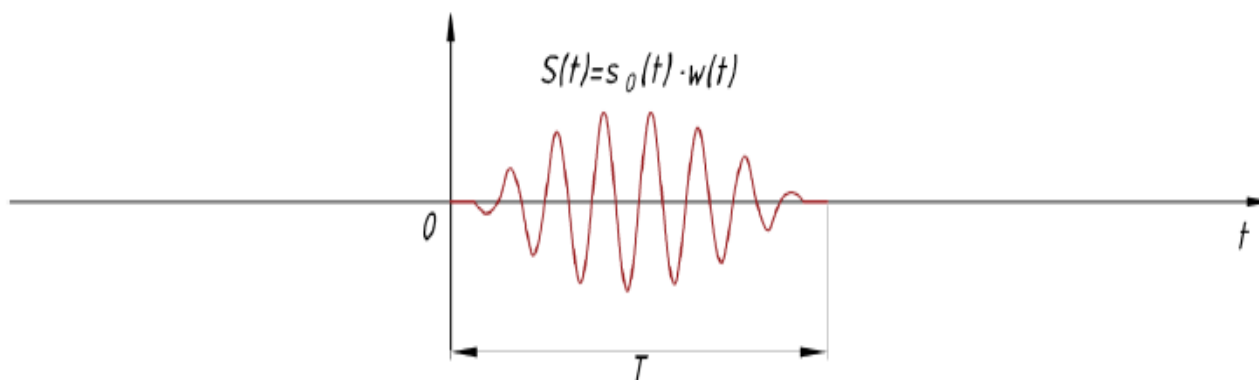


Рис. 2.2 Амплітудно промодельований сигнал  $s(t)$

Сформувати сигнал  $s(t)$  можна за допомогою амплітудно-імпульсної модуляції, представивши сигнал у вигляді:

$$s(t) = A_0(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_0 t;$$

$$s(t) = A_0 \left[ \cos \omega_0 t + \frac{m}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t + \frac{m}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t \right],$$

де  $\omega_0 = 450 \text{ кГц}$  – частота несучої, рівна частоті магнітного резонансу,  $\Omega = 7.2 \text{ кГц}$  – частота модуляції,  $m$  – коефіцієнт модуляції (для модульованої послідовності Хана  $m=1$ ),  $A_0$  – амплітуда сигналу. Для формування такого генератора необхідно використовувати три генератора синусоїдальних напруг при цьому амплітуди бокових гармонік складають 50% від амплітуди основної гармоніки.

В методі каротажу виникає необхідність формувати зондувальні імпульси потужністю в сотні ватт. Для цього використовується ключовий режим роботи перетворювача, тобто доцільно використовувати інвертор напруги, а зондувальний сигнал формувати на основі широтно-імпульсної модуляції.



## 2. РОЗРОБКА ЗОНДУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

### 2.1. Проектування структурної схеми багаторівневого інвертора

Розроблена структурна схема зображена на рис. 2.1.

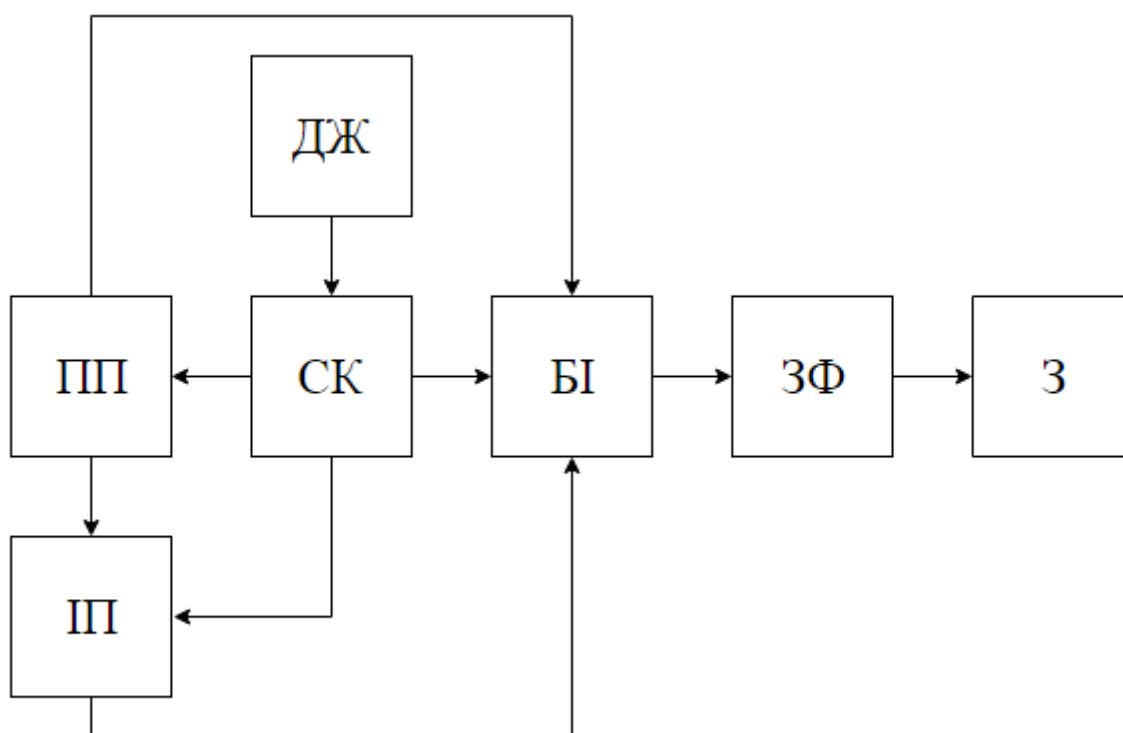


Рис. 2.1 Структурна схема зондувального пристрою

Структурна схема містить наступні елементи:

- СК – система керування;
- ПП – підвищуючий перетворювач;
- ІІ – інвертуючий перетворювач керування;
- БІ – багаторівневий інвертор напруги;
- ЗФ – згладжуючий фільтр;
- З – зонд;
- ДЖ – джерело живлення.

Спочатку постійна напруга з джерела живлення (ДЖ) потрапляє в систему керування (СК), котра створює ШІМ-сигнал для керування підвищуючим перетворювачем (ПП).

Підвищуючий перетворювач створює постійну напругу вищого рівня для живлення позитивного плеча багаторівневого інвертора (БІ). Також система керування створює ШІМ-сигнал для керування інвертуючого перетворювача (ІП), котрий живиться від підвищуючого перетворювача (ПП), та створює негативну напругу, рівну за модулем напрузі на виході підвищуючого перетворювача, для живлення негативного плеча багаторівневого інвертора (БІ).

Коли створена напруга живлення на вході багаторівневого інвертора, система керування створює імпульси для відкриття керованих ключів у багаторівневому інверторі. Згенерована багаторівнева напруга на виході багаторівневого інвертора згладжується згладжуючим фільтром (ЗФ), та потрапляє на зонд (З), котрий випромінює створений зондуючий сигнал.

## 2.2. Розробка схеми електричної принципової

На основі структурної схеми створено електричну принципову схему зондувального пристрою на основі трирівневого інвертора з плаваючими конденсаторами (рис.2.2), та на основі п'ятирівневого інвертора (рис.2.3).

Транзистори в підвищуючому перетворювачі та в інвертуючому перетворювачі під'єднані до ШІМ виходів мікроконтроллера та відповідно.

Створена напруга підвищуючим перетворювачем подається на позитивне плече багаторівневого інвертора, та позначається  $+V_{in}$ , а напруга з інвертуючого перетворювача на негативне плече багаторівневого інвертора та позначається  $-V_{in}$ .

					ДС51.510.403.001ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

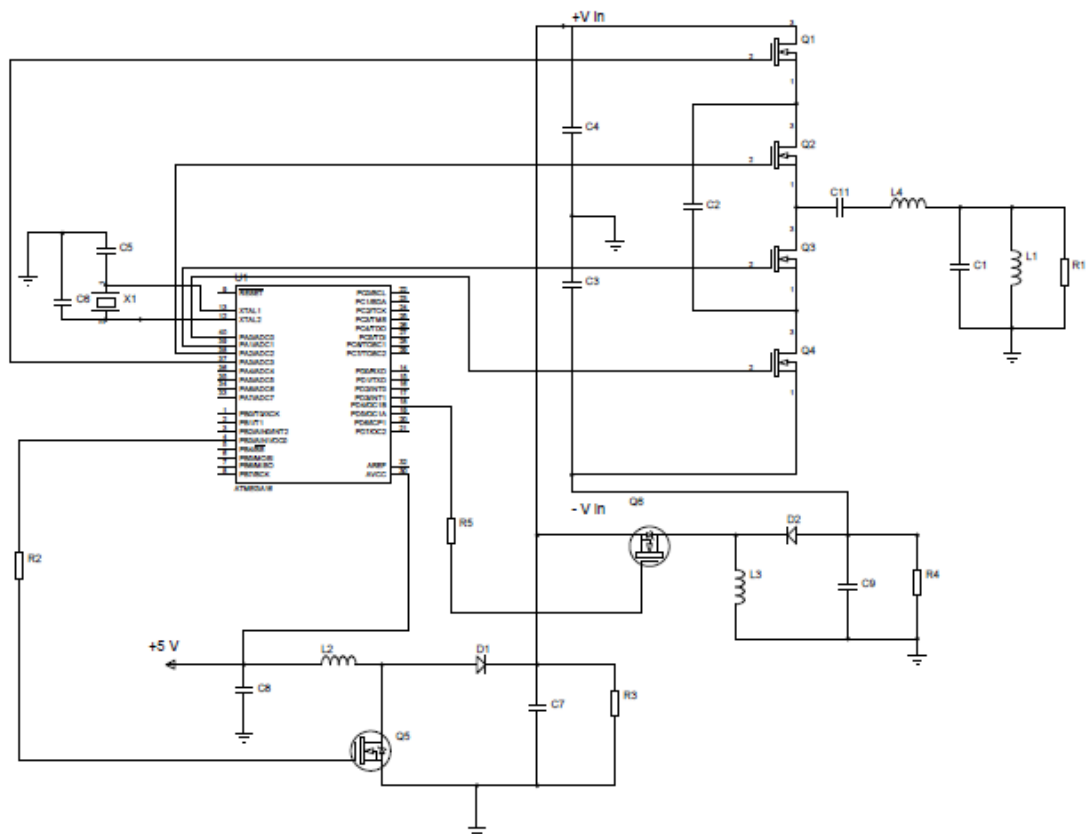


Рис. 2.2 Схема електрична принципова зондувального пристрою з трирівневим інвертором з плаваючими конденсаторами

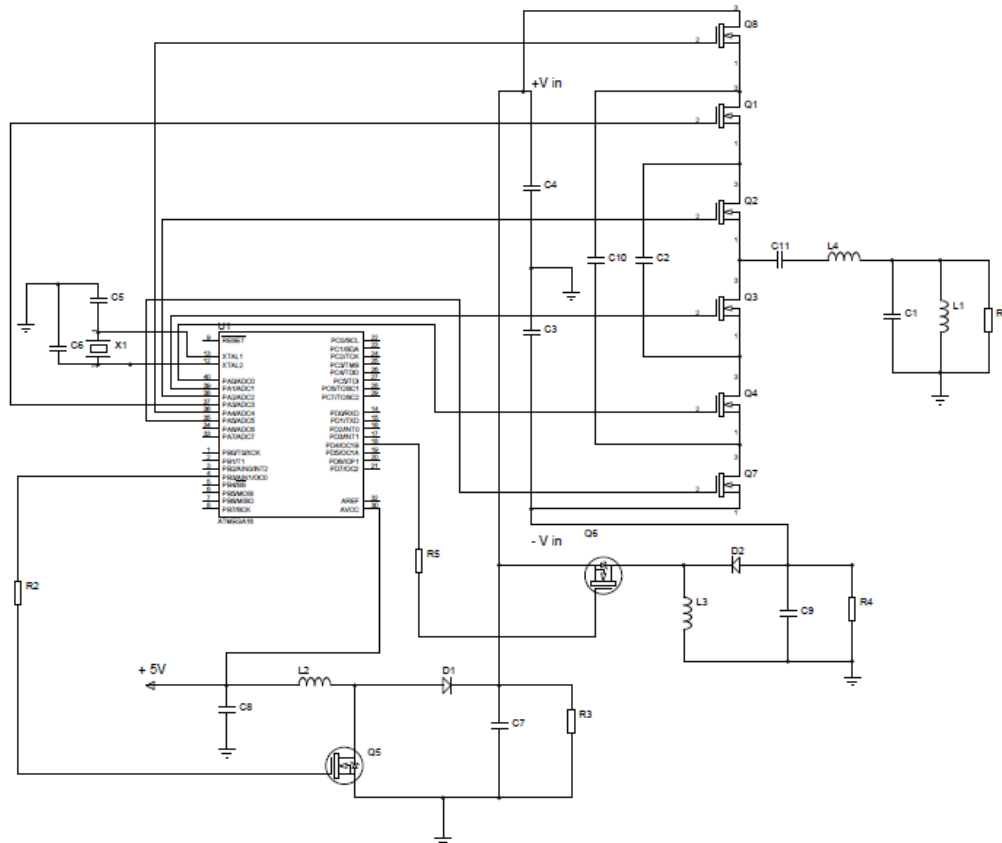


Рис. 2.3 Схема електрична принципова зондувального пристрою з п'ятирівневим інвертором з плаваючими конденсаторами

					ДС51.510.403.001ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

## Перетворювач постійної напруги в постійну напругу вищого рівня

В якості генератора високовольної напруги для живлення інвертора використаємо перетворювач напруги в напругу вищого рівня на основі широтно-імпульсної модуляції, котра генерується за допомогою мікроконтролера.

Він складається з MOSFET транзистора Q5, дроселя L2, діода D1, конденсатора C7, та резистора R3.

Для розрахунку параметрів перетворювача використаємо формулу, що описує поведінку індуктивності:

$$U_L = -L \frac{dI_L}{dt},$$

де  $U_L$  та  $I_L$  – це напруга та струм на індуктивності відповідно.

Оберемо індуктивність дроселя L2 1мГн. В перший інтервал часу транзистор Q5 відкритий, діод D1 закритий, а до дроселя L2 прикладено напругу живлення.

В другий інтервал часу транзистор Q5 закритий, діод D1 відкритий та до дроселя прикладено різницю напруги на навантаженні та напругу живлення. Оскільки в п'ятирівневому інверторі з плаваючими конденсаторами кількість рівнів не враховуючи нульовий в двічі більше ніж у трирівневому, то і напруга буде ділитися в чотири рази на кожному плечі, навідміну від двох разів у трьохрівневому, тому підвищуючий перетворювач буде розраховуватися для двох типів багаторівневого інвертора. Користуючись цим можна скласти систему рівнянь для 5-ти рівневого інвертора та трирівневого інвертора:

$$U_{in} = L \frac{\Delta I_L}{t_{on}};$$

$$U_{out} - U_{in} = L \frac{\Delta I_L}{t_{off}}.$$

де  $t_{on}$  та  $t_{off}$  – це тривалості ввімкненого та вимкненого стану транзистора, а  $U_{in}$  та  $U_{out}$  – це напруга живлення та на навантаженні перетворювача.

Виразимо з попередньої системи тривалості ввімкненого та вимкненого транзистора для трирівневого інвертора:

					ДС51.510.403.001ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$t_{on} = L \frac{\Delta I_L}{U_{in}} = 10^{-3} \frac{300}{400} = 0,75 \text{ мс};$$

$$t_{off} = L \frac{\Delta I_L}{U_{out} - U_{in}} = 10^{-3} \frac{300}{400 - 5} = 0,76 \text{ мс}.$$

Виразимо тривалості ввімкненого та вимкненого стану для п'ятирівневого інвертора:

$$t_{on} = L \frac{\Delta I_L}{U_{in}} = 10^{-3} \frac{300}{800} = 0,375 \text{ мс};$$

$$t_{off} = L \frac{\Delta I_L}{U_{out} - U_{in}} = 10^{-3} \frac{300}{800 - 5} = 0,377 \text{ мс}.$$

Розрахуємо коефіцієнт заповнення імпульсів для трирівневого інвертора:

$$f = \frac{U}{I} = \frac{1}{t_{on} + t_{off}} = \frac{1}{0,75 \cdot 10^{-3} + 0,76 \cdot 10^{-3}} = 662 \text{ Гц};$$

$$\gamma = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = 0,5.$$

Розрахуємо коефіцієнт заповнення імпульсів для п'ятирівневого інвертора:

$$f = \frac{U}{I} = \frac{1}{t_{on} + t_{off}} = \frac{1}{0,375 \cdot 10^{-3} + 0,377 \cdot 10^{-3}} = 1330 \text{ Гц};$$

$$\gamma = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = 0,5.$$

В якості mosfet – транзистора Q5 візьмемо транзистор STB18NM80, котрий здатен працювати з напругою стік-витік 800 В, а в якості діода D1 D171-400, максимальна зворотня напруга котрого 1000 В, а прямий струм 300А.

Для згладжування напруги на виході мосфет транзистора використовується конденсатор C7 ємністю 47 нФ, розрахований на 800V.

### Інвертуючий перетворювач постійної напруги

Оскільки інвертор з плаваючими конденсаторами використовує для живлення два рівні напруги +Vin та -Vin, то необхідно створити інверторвану напругу, відносно напруги, що створює підвищуючий перетворювач. Для цього використовується інвертуючий перетворювач, на основі ШІМ, що генерується мікроконтроллером. Оскільки формули для його розрахунку ідентичні, до

					ДС51.510.403.001ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

формул підвищуючого перетворювача, то номінали елементів будуть такі самі, адже напруги та струми, з котрими оперує перетворювач залишаються ті самі. Таким чином інвертуючий перетворювач для схеми з трирівневим інвертором складається з MOSFET транзистора Q6, дроселя L3, діода D2, конденсатора C9, та резистора R4, а для схеми з 5-ти рівневим інвертором з MOSFET транзистора Q6, дроселя L3, діода D2, конденсатора C9, та резистора R4.

### **Система керування**

В якості системи керування використовується 8-бітний AVR мікроконтролер ATmega16, фірми Atmel. Він має робочий діапазон частот до 16 МГц, достатню кількість пам'яті для збереження програми керування перетворювачами та багаторівневим інвертором, і не потребує додаткової периферії для роботи. Напруга живлення контролера – п'ять вольт. Для задання робочої частоти контролера використовується кварцевий резонатор X1 на 16 МГц. Кварцевий резонатор з'єднується з нульовим виводом через конденсатори C5, C6 для забезпечення стійкості роботи кварца від завад.

### **Трирівневий інвертор з плаваючими конденсаторами**

На рис.2.4 зображено принципову електричну схему трирівневого інвертора з плаваючими конденсаторами.

					ДС51.510.403.001ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

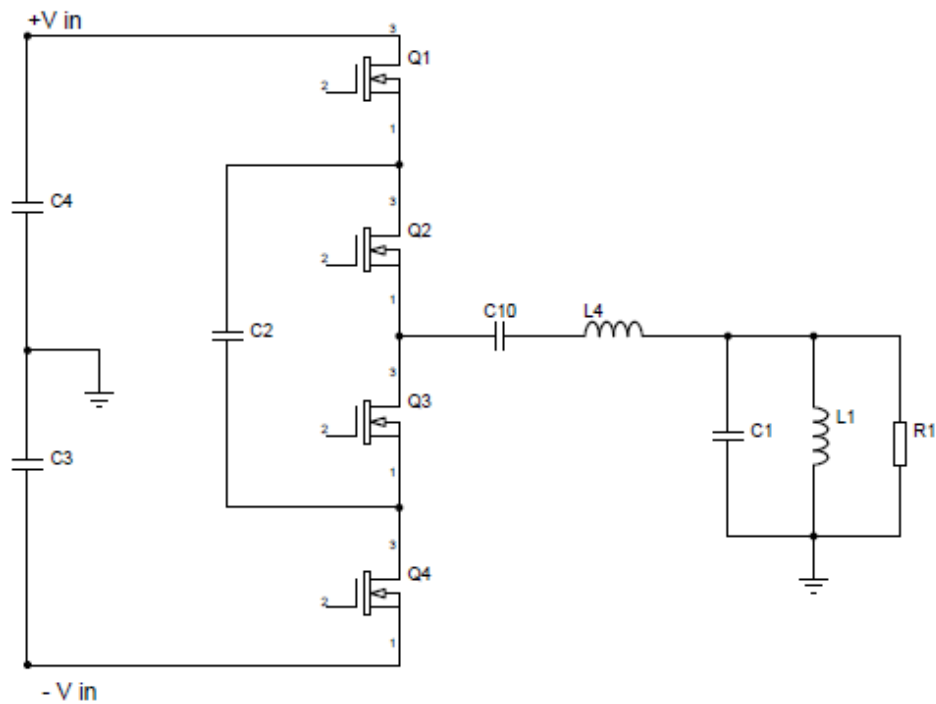


Рис. 2.4 Трирівневий інвертор з плаваючими конденсаторами

Схема містить наступні елементи:

- джерело живлення з двома полярностями  $+V_{in}$ ,  $-V_{in}$ ;
- транзистори Q1-Q4, що працюють в ключовому режимі;
- конденсатор C2;
- конденсатори C3 та C4, для створення нейтральної точки;
- вихідний фільтр C10, L4, котрий налаштований на резонанс;  
випромінювач сигналу C1, L1, R1, котрий налаштований на резонанс.

На рис.2.5 зображено часові діаграми роботи системи керування трирівневого інвертора.

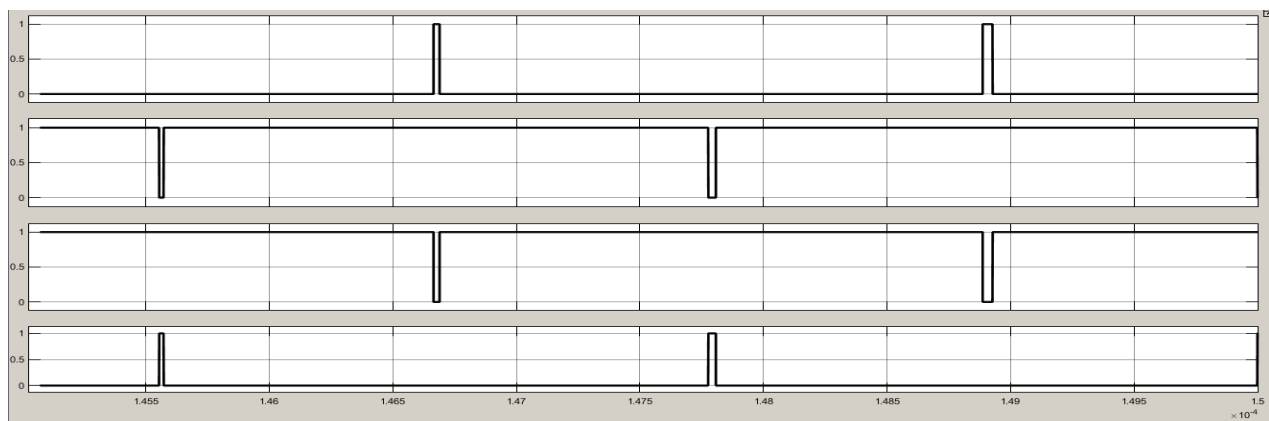


Рис. 2.5 Часові діаграми роботи ключів трирівневого інвертора

В перший момент часу увімкнені транзистори Q1 та Q2 та до навантаження прикладена позитивна напруга  $+V_{in}$ .

Коли увімкнений зовнішній транзистор, то конденсатор C2 заряджається до напруги  $V_{in}$ , тобто напруга живлення ділиться навпіл між конденсатором та закритим транзистором, з'єднаним з протилежним полюсом джерела живлення.

Таким чином напруга з конденсатора подається на навантаження, або вираховується з напруги джерела живлення, і в обох випадках на навантаженні напруга становитиме  $V_{in}$ .

Після цього транзистор Q1 вимикається та вмикається Q3, і до навантаження прикладається нульовий рівень напруги. Потім Q2 вимикається і вмикається Q4, і до навантаження прикладається негативна напруга  $-V_{in}$ .

Стани ключів наведено у табл. 2.1

Таблиця 2.1

$U_{\text{навантаження}}$	Q1	Q2	Q3	Q4
$+V_{in}$	1	1	0	0
0	0	1	1	0
$-V_{in}$	0	0	1	1

Фільтр C10, L4 налаштований на резонанс напруги. Оскільки струм і напруга мають співпадати по фазі, то використаємо формулу резонансу, при умові, що активний опір рівний нулю:  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ .



Контур C1, L1 також налаштований на резонанс струмів, при якому провідність контура рівна нулю, і струм котрий протікатиме через C1, L1 буде текти і через R1.

При максимальній напрузі в навантаженні  $U=400$  В та струмі через навантаження  $I=300$  А за законом Ома опір R буде дорівнювати:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{400}{300} = 1,33, [\text{Ом}].$$

З умови виникнення резонансу при  $f = 450$  кГц,  
 $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 450 \cdot 10^3 = 2,826 \cdot 10^6$ , виразивши C отримаємо:

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} = 12,52 \cdot 10^{-6}, [\text{Ф}].$$

Максимальна напруга, прикладена до транзистора буде за умови, коли ввімкнені Q1 та Q2, таким чином:

$$U_{Q1} + U_{Q2} = V_{in},$$

де  $U_{Q1}$ , та  $U_{Q2}$  напруги на транзисторах Q1 та Q2 відповідно.

Оскільки транзистори однакові, то до послідовно з'єднаних транзисторах буде прикладена однакова напруга, тобто:

$$U_{Q1} = U_{Q2} = V_{in} / 2 = 400 / 2 = 200 \text{ В}.$$

Максимальний струм, котрий протікає через транзистори Q1 та Q2 буде дорівнювати струму, що протікає через навантаження R, оскільки C10, L4 та L1, C1 налаштовані на резонанс, тобто  $I_{Q1} = 300$  А.

Таким чином під дані параметри оберемо транзистор IPP120N20NFD.

В результаті моделювання отримуємо осцилограму напруги на навантаженні, котра відповідає сформованому сигналу Хана (рис. 2.6).

					ДС51.510.403.001ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

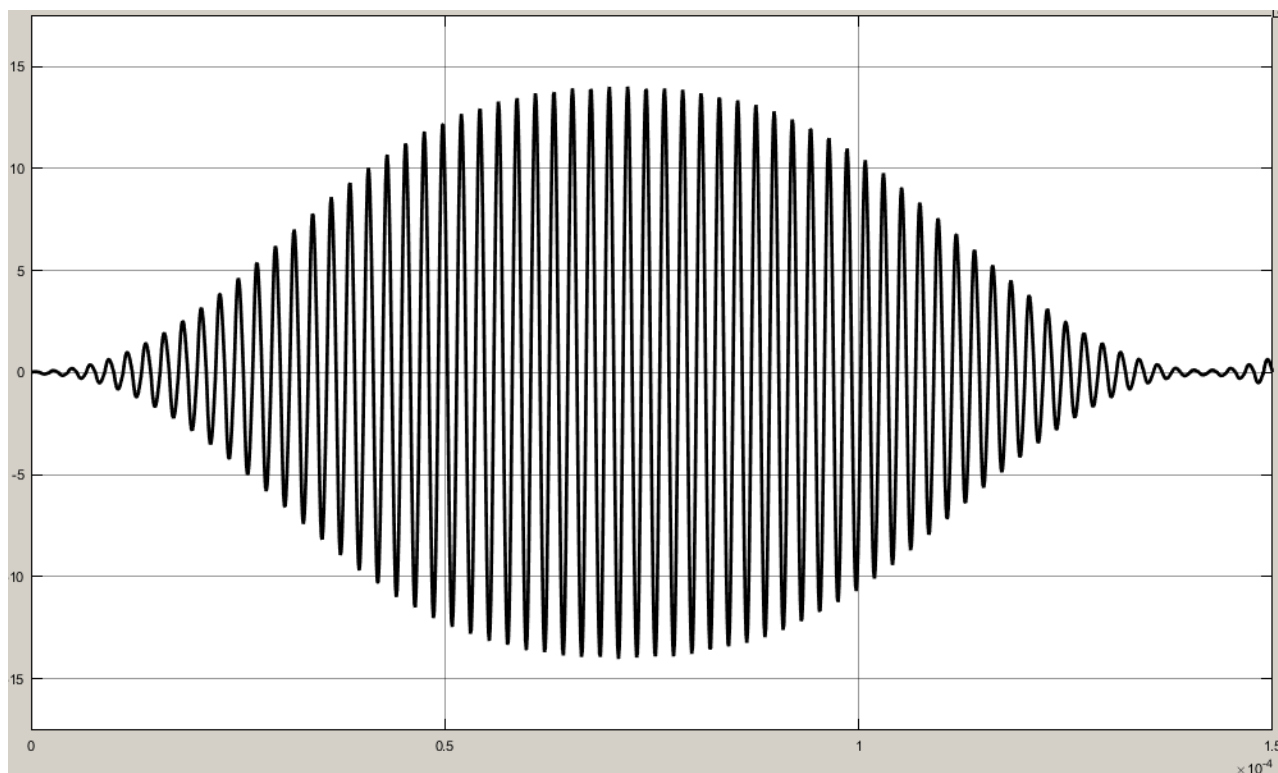


Рис. 2.6 Сигнал Хана отриманий в результаті симуляції в схемі з трирівневим інвертором

Провівши спектральний аналіз сигналу (рис. 2.7), можна визначити, що амплітуди бокових гармонік від основної складають 0.55 та 0.45, що наближено до половини амплітуди основної гармоніки.

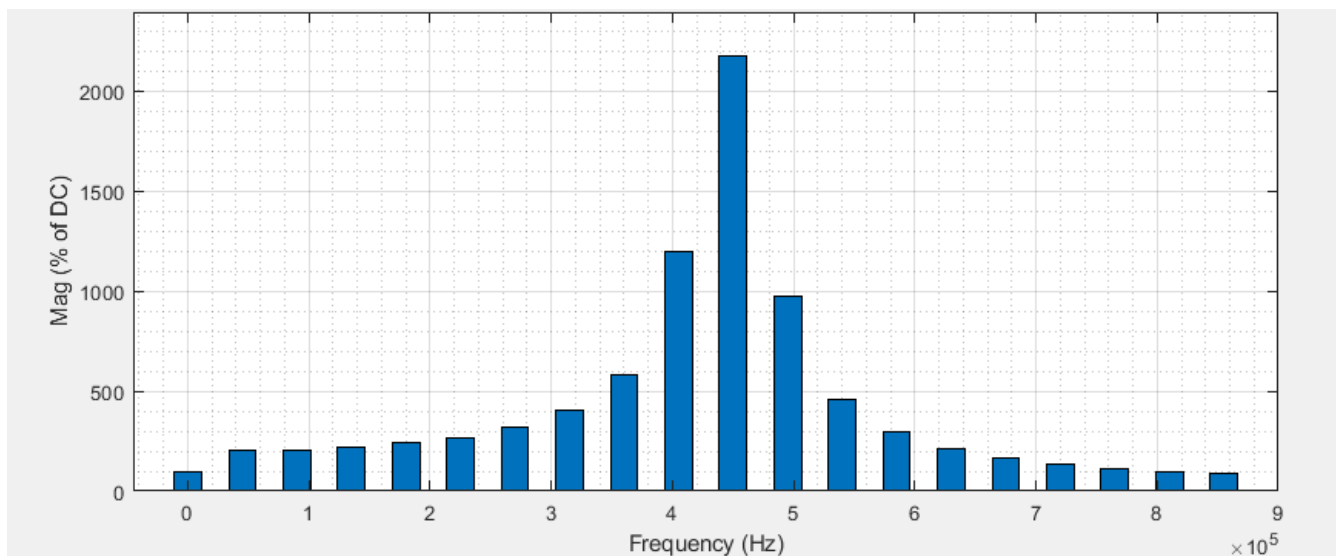


Рис. 2.7 Спектральний аналіз отриманого сигналу в схемі з трирівневим інвертором

### П'ятирівневий інвертор з плаваючими конденсаторами

					ДС51.510.403.001ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

На рис. 2.8 зображено принципову електричну схему зондувального пристрою з п'ятирівневим інвертором з плаваючими конденсаторами.

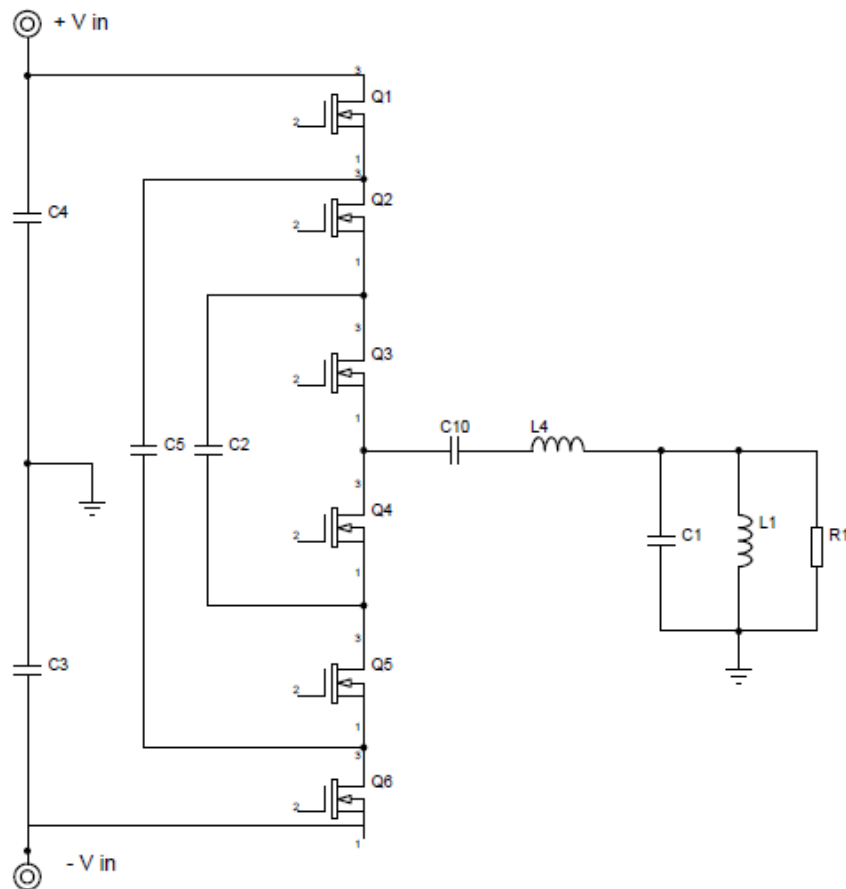


Рис. 2.8 П'ятирівневий інвертор з плаваючими конденсаторами

Схема містить наступні елементи:

- джерело живлення з двома полярностями  $+V_{in}$ ,  $-V_{in}$ ;
- транзистори Q1-Q6, що працюють в ключовому режимі;
- конденсатори C2, C5;
- конденсатори C3 та C4, для створення нейтральної точки;
- вихідний фільтр C10, L4, котрий налаштований на резонанс;
- випромінювач сигналу C1, L1, R1, котрий налаштований на резонанс.

На рис.2.9 зображено часові діаграми роботи ключів в п'ятирівневому інверторі.

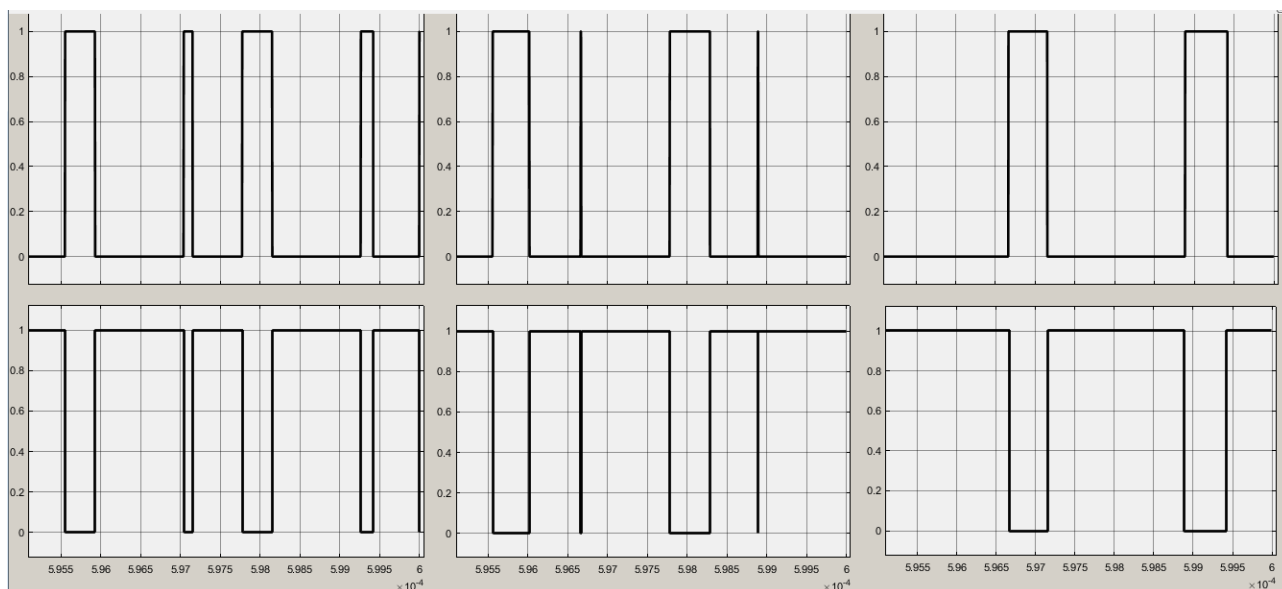


Рис. 2.9 Часові діаграми роботи ключів п'ятирівневого інвертора

В перший момент часу ввімкнені транзистори Q1,Q3,Q5 та до навантаження прикладена позитивна напруга  $+V_{in}/2$ .

Коли транзистори ввімкнені таким чином, що конденсатори C2 та C5 з'єднані послідовно, тобто при комбінації ввімкнених ключів Q1,Q3,Q5 або Q2,Q4,Q6, то послідовно з'єднані конденсатори зарядяться до значення  $V_{in}/2$  кожний, і ця напруга подається на навантаження, або вираховується з напруги джерела живлення, і в обох випадках на навантаженні напруга становитиме  $V_{in}/2$ .

Після цього транзистор Q1 та Q3 вимикається та вмикається Q4, і до навантаження прикладається нульовий рівень напруги. Потім Q5 вимикається і вмикається Q2 та Q6, і до навантаження прикладається негативна напруга  $-V_{in}/2$ .

Потім знову встановлюється нульовий рівень вимиканням Q6 та Q4 та вмиканням Q3.

Тоді вмикається Q1 та до навантаження прикладається позитивна напруга  $+V_{in}$ . Потім знову встановлюється нульовий рівень та вмикаються транзистори Q4,Q5,Q6 та до навантаження прикладається напруга  $-V_{in}$ .

Стани ключів наведено у табл. 2.2

Таблиця 2.2

					ДС51.510.403.001ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

$U_{\text{навантаження}}$	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
$+V_{in}/2$	1	0	1	0	1	0
0	0	0	0	1	1	0
$-V_{in}/2$	0	1	0	1	0	1
0	0	1	1	0	0	0
$+V_{in}$	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0
$-V_{in}$	0	0	0	1	1	1

В результаті моделювання отримуємо наступну осцилограму напруги на навантаженні (рис. 2.10).

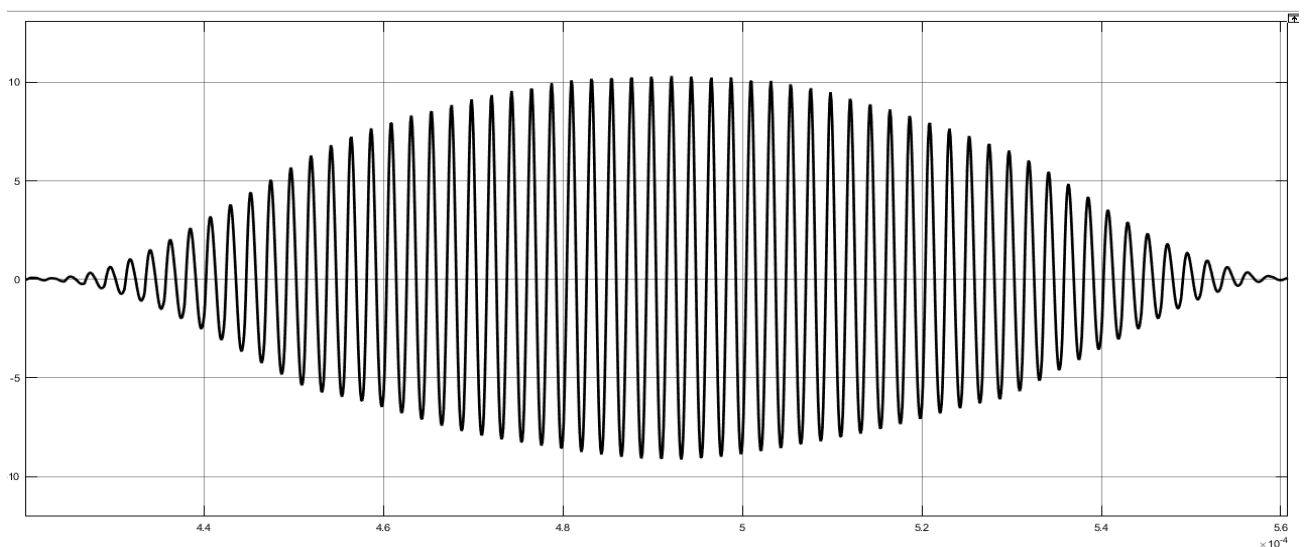


Рис. 2.10 Сигнал Хана отриманий в результаті симуляції в схемі з п'ятирівневим інвертором

Провівши спектральний аналіз сигналу (рис. 2.11), можна визначити, що амплітуди бокових гармонік від основної складають 0.48 та 0.53.

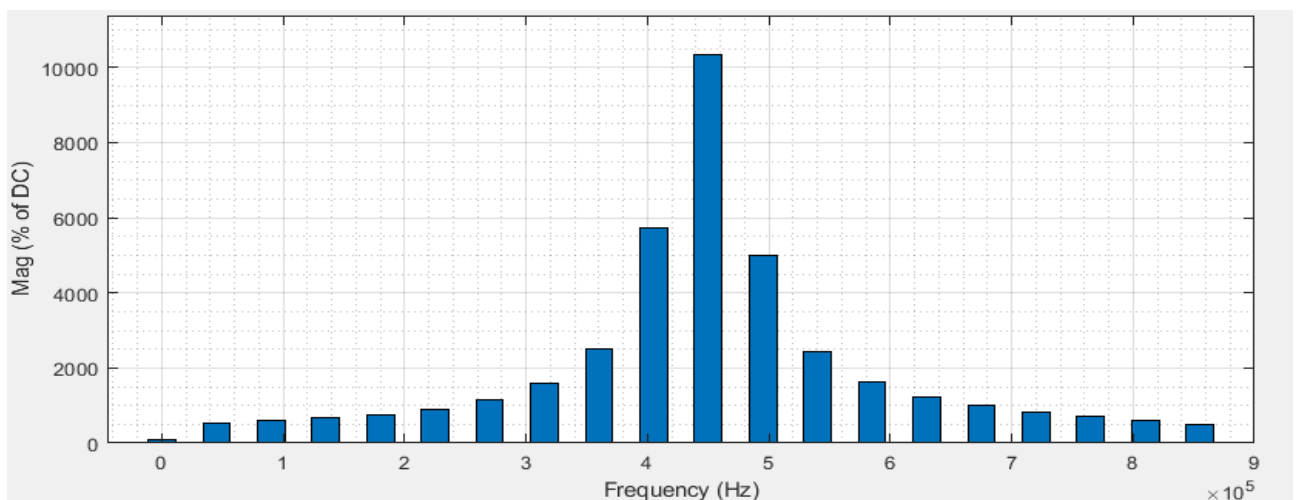


Рис. 2.11 Спектральний аналіз отриманого сигналу в схемі з п'ятирівневим інвертором

					ДС51.510.403.001ПЗ		Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			28

### 3. МОДЕЛЮВАННЯ В СЕРЕДОВИЩІ SIMULINK

#### 3.1. Створення моделей зондувального пристрою в середовищі Simulink

Моделі зондувального пристрою з трирівневим інвертором (рис. 3.1), та з п'ятирівневим інвертором (рис. 3.2) складається з:

- джерела постійної напруги (E);
- RLC навантаження (Series RLC Branch);
- керованих ключів (Ideal Switch);
- блоків вимірювання миттєвого значення напруги (V load);
- блоків вимірювання миттєвого значення струму (I load);
- блоків вимірювання середньоквадратичного значення (RMS);
- блоку керування (Subsystem);
- блоку синусоїди (Sine Wave Function);
- осцилографів (Scope);
- землі (Ground);
- блоків для обробки значень (To Workspace).

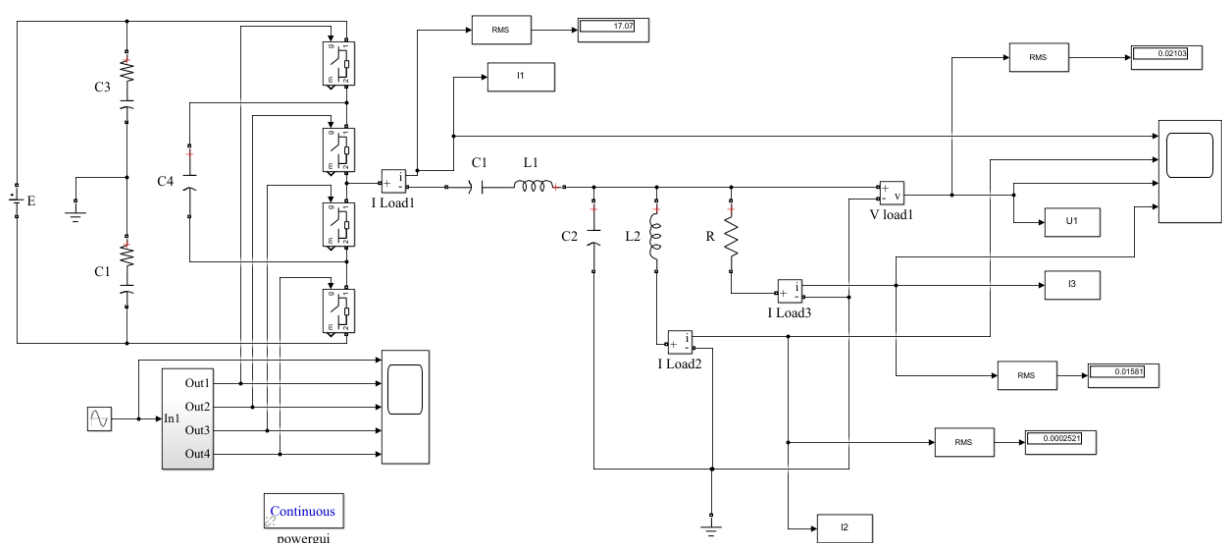


Рис. 3.1 Модель зондувального пристрою з трирівневим інвертором у середовищі Matlab Simulink

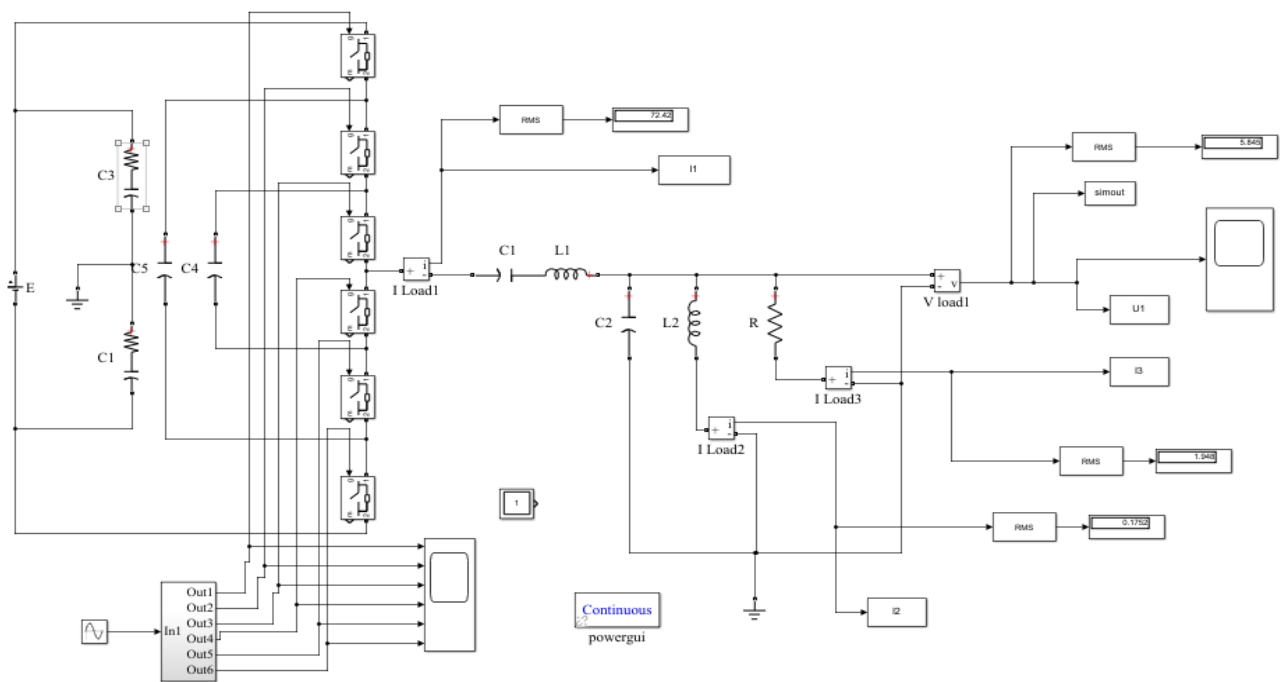


Рис. 3.2 Модель зондувального пристрою з п'ятирівневим інвертором у середовищі Matlab Simulink

Налаштування блоку постійної напруги (E) зображено на рис.3.3. Він складається з параметру Amplitude, в котрий записується напруга живлення інвертора.

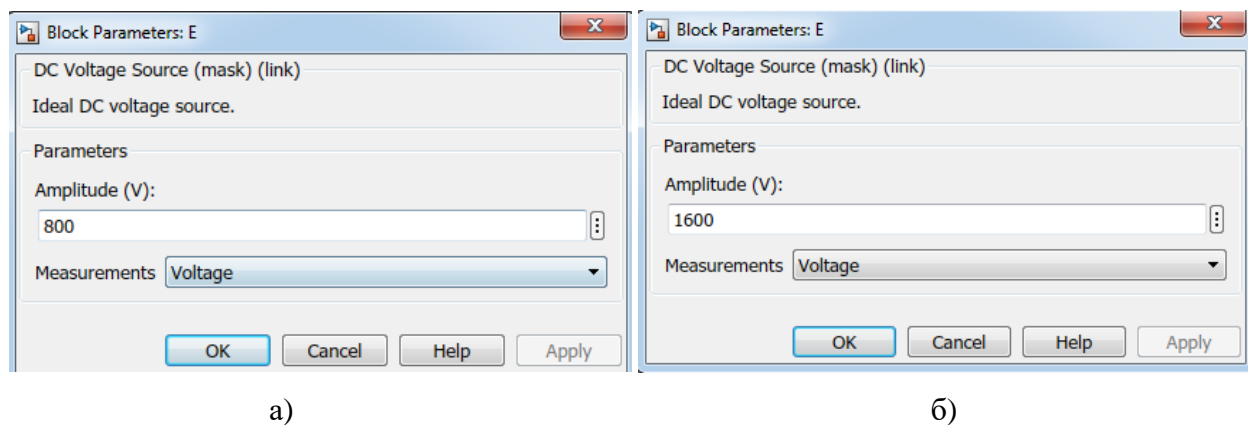
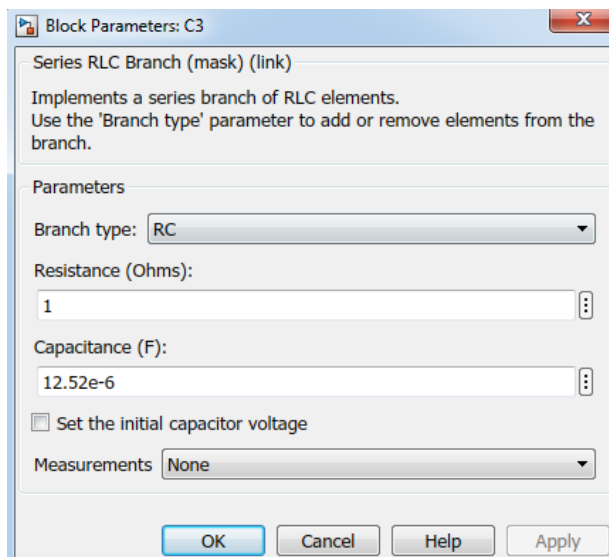


Рис. 3.3 Налаштування блоку постійної напруги E а) для трирівневого інвертора б) для п'ятирівневого інвертора

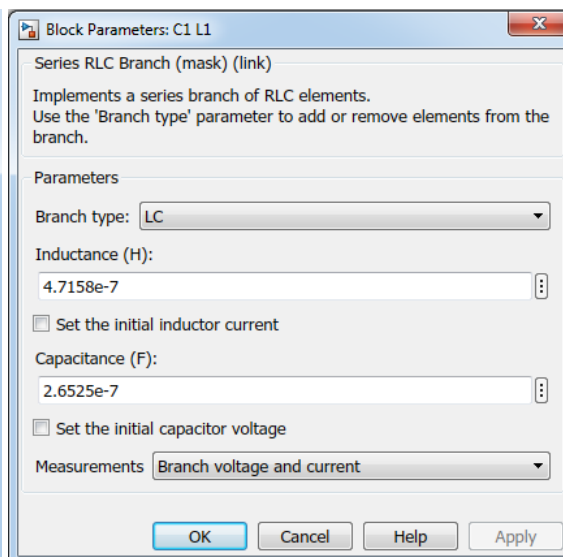
Налаштування блоків RLC навантаження (Series RLC Branch) зображено на рис.3.4.

Цей блок містить наступні налаштування:

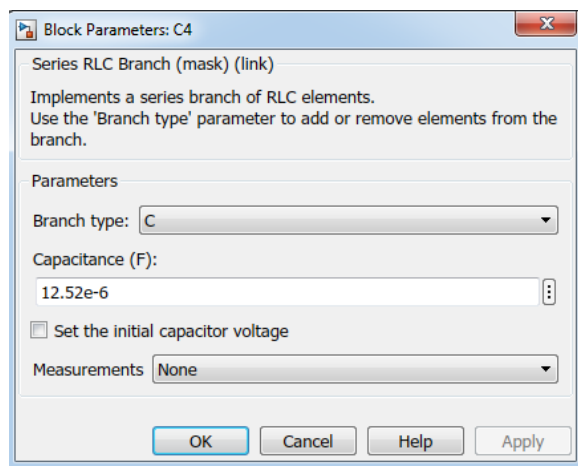
- Branch type – тип навантаження;
- Resistance (Ohms) – опір;
- Capacitance (F) – ємність;
- Inductance (H) – індуктивність.



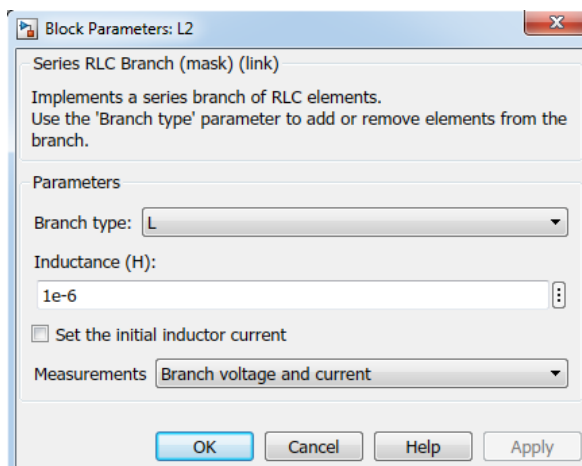
а)



б)

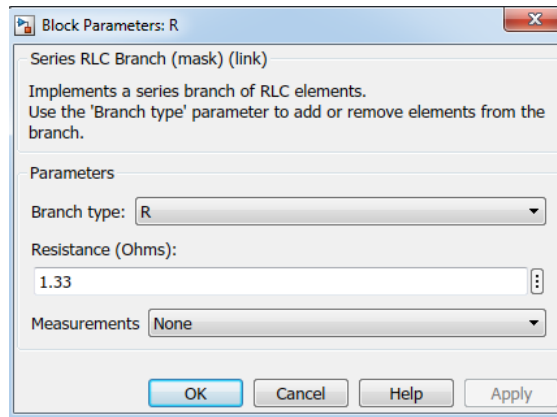


в)



г)





д)

Рис. 3.4 Налаштування блоків RLC навантаження (Series RLC Branch а): для C3 та C1, б) для C1L1, в) для C2,C4 та C5, г) для L2, д) для R

Налаштування керованих ключів (Ideal Switch) зображено на рис.3.5.

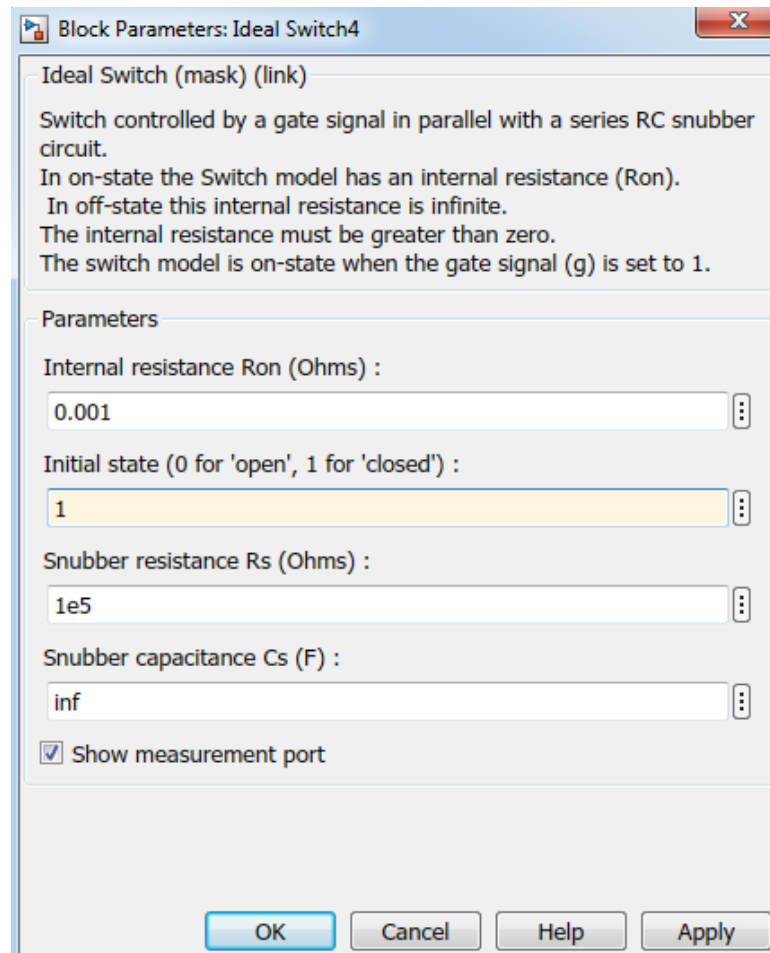


Рис. 3.5. Блок налаштування керованих ключів (Ideal Switch)

Блок налаштування керованих ключів містить наступні налаштування:

- Internal resistance  $R_{on}$  (Ohms) – внутрішній опір керованого ключа;
- Initial state (0 for open, 1 for closed) – початковий стан;
- Snubber resistance  $R_s$  (Ohms) – демпфуючий опір;
- Snubber capacitance  $C_s$  (F) – демпфуюча ємність.

Налаштування блоку синусоїди (Sine Wave Function) зображено на рис.3.6.

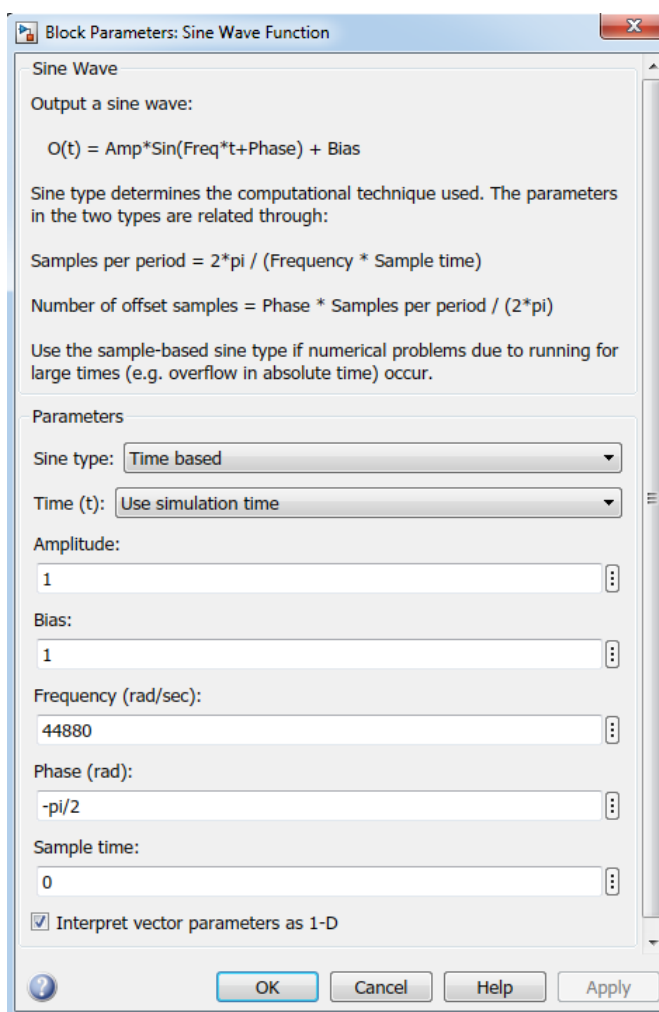


Рис. 3.6 Блок налаштування блоку синусоїди (Sine Wave Function)

Блок налаштування блоку синусоїди складається з:

- Sine type;
- Time;
- Amplitude;

- Bias;
- Frequency;
- Phase (rad);
- Sample time.

### 3.2. Моделювання системи керування трирівневого інвертора

Модель системи керування для трирівневого інвертора зображено на рис.3.7. Ця модель складається з:

- генератора пилоподібної напруги (Repeating Sequence);
- блоків суми (Sum);
- блоку реле (Relay) ;
- генератора синусоїди (Sine Wave) ;
- ключів (Switch) ;
- блоку логічного оператора НІ (Logical Operator NOT) ;
- осцилографів (Scope).

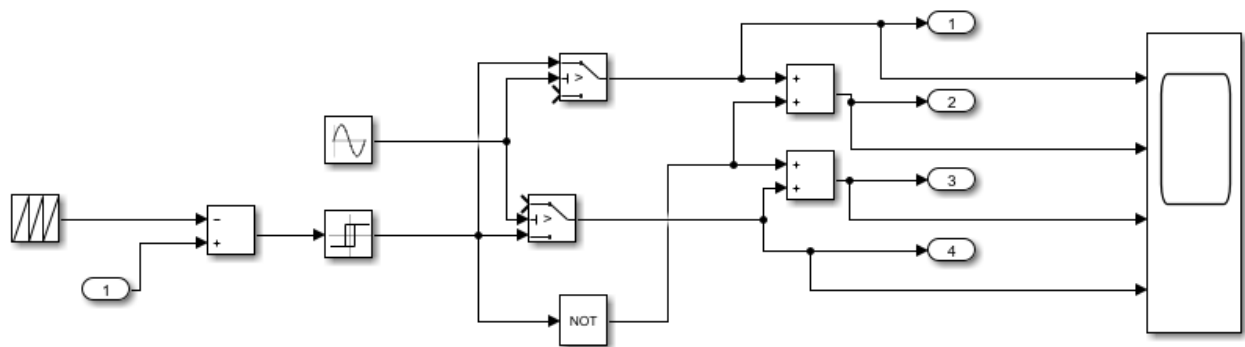
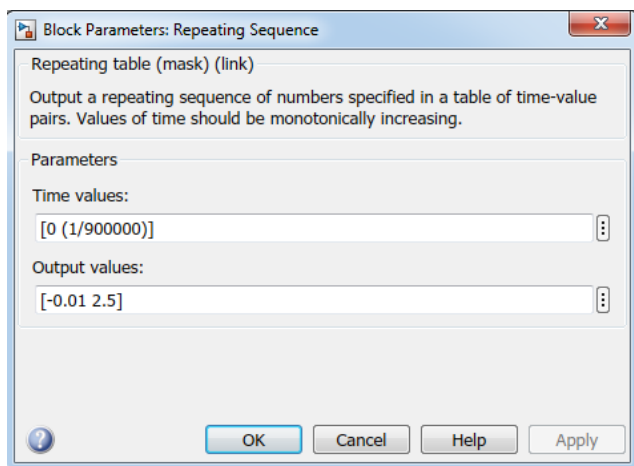
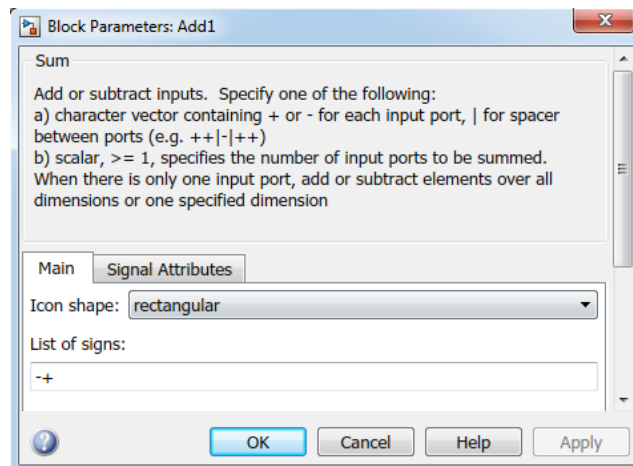


Рис. 3.7 система керування трирівневого інвертора

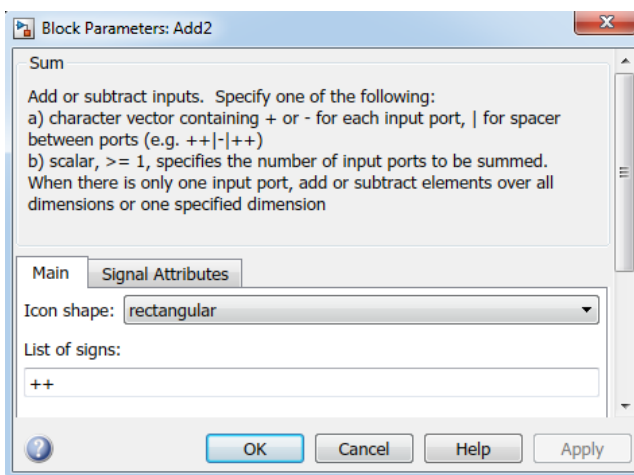
Налаштування блоків системи керування зображені на рис.3.8.



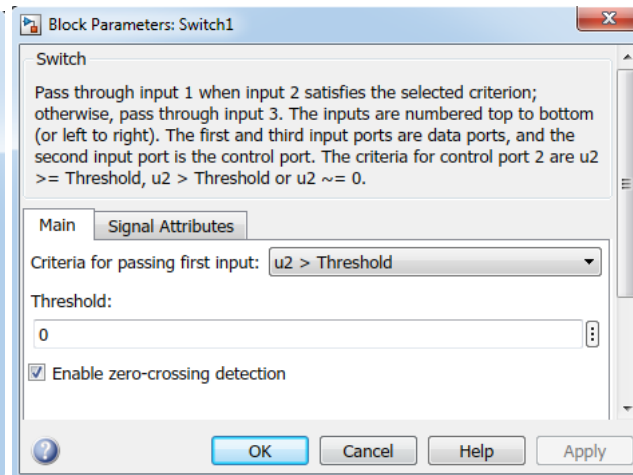
a)



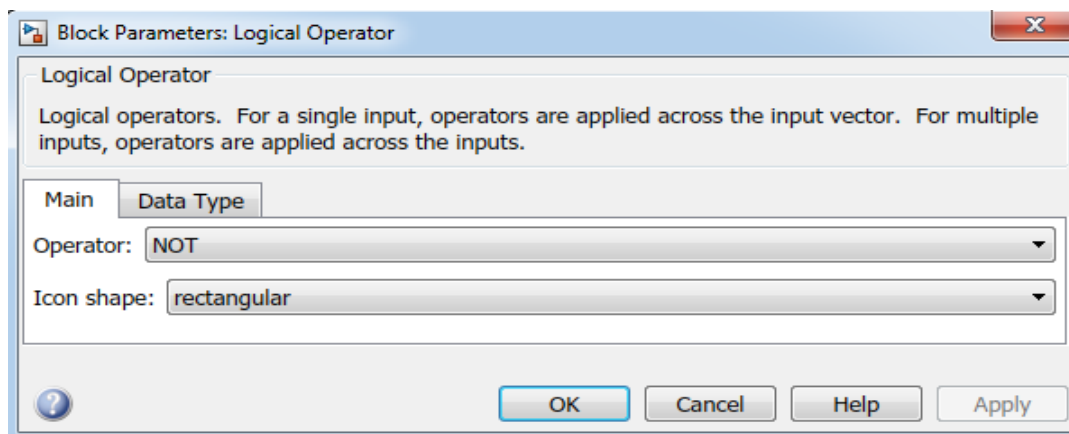
б)



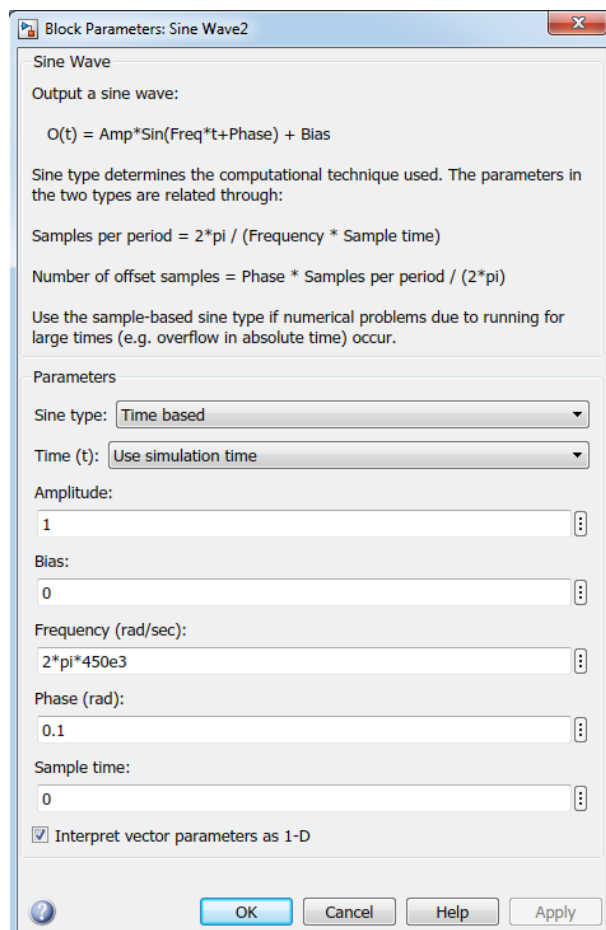
в)



г)



д)



е)

Рис. 3.8 а) Налаштування блоку генератора пилоподібної напруги (Repeating Sequence), б,в) блоків суми (Sum), г) блоків ключів (Switch), д) блоку логічного оператора НІ (Logical Operator NOT, е) блоку генератора синусоїди (Sine Wave)

### 3.3. Моделювання системи керування п'ятирівневого інвертора

Модель системи керування для п'ятирівневого інвертора зображено на рис.3.9. Ця модель складається з:

- генератора пилоподібної напруги (Repeating Sequence);
- блоку суми (Sum);
- блоку реле (Relay) ;
- генераторів синусоїди (Sine Wave) ;
- ключів (Switch) ;
- блоку логічного оператора НІ (Logical Operator NOT) ;
- осцилографів (Scope).

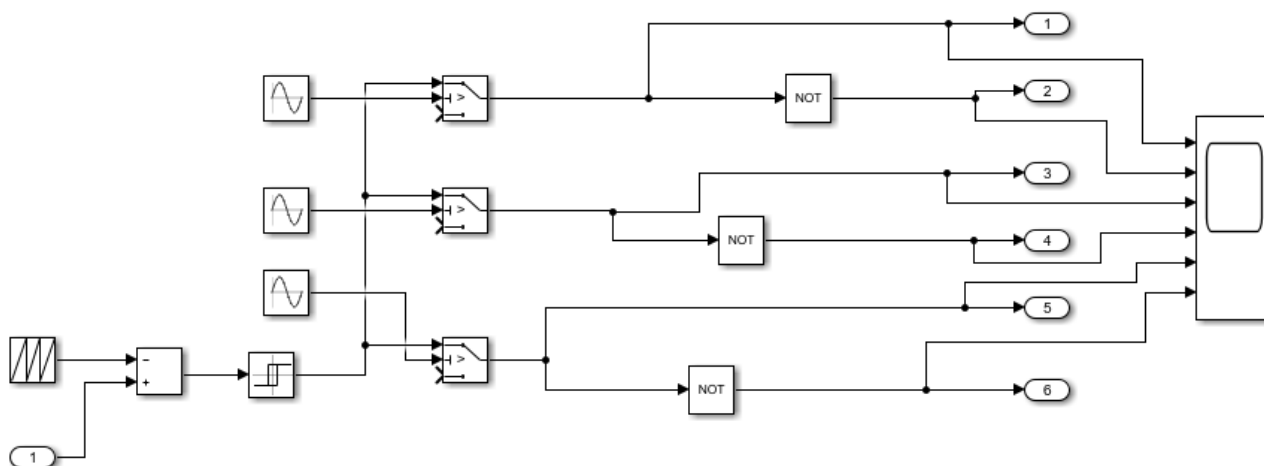
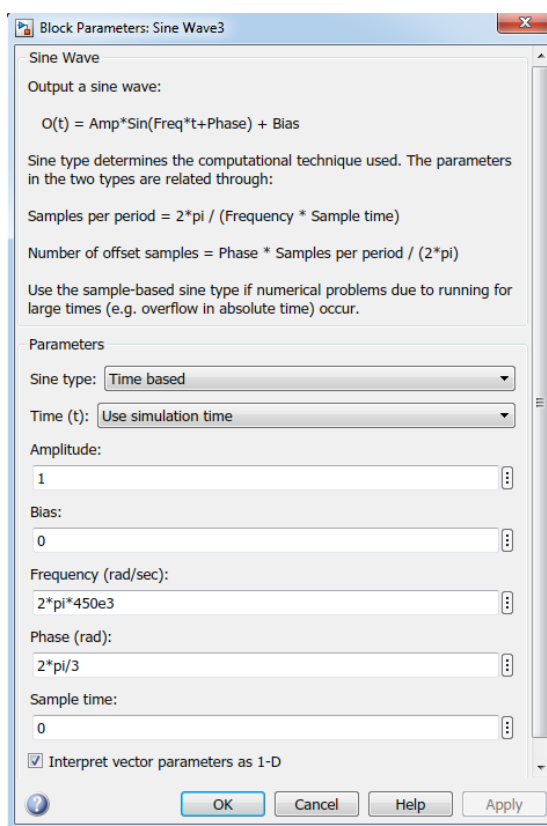
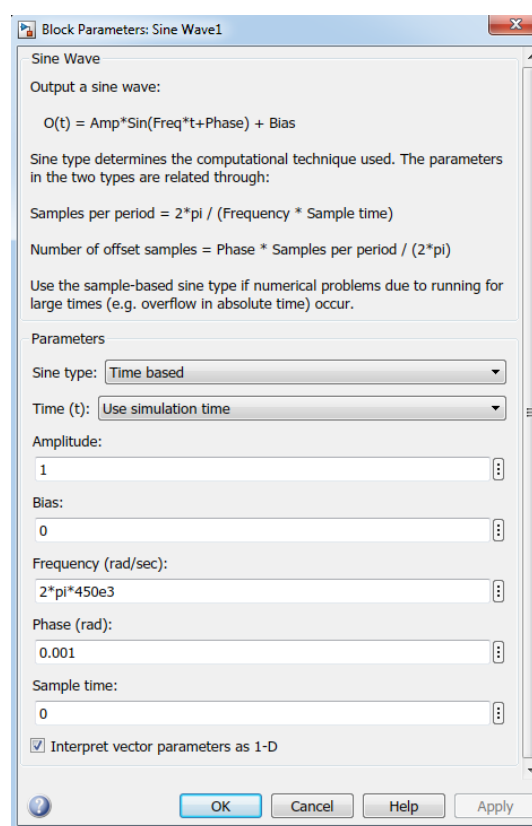


Рис. 3.9 система керування п'ятирівневого інвертора

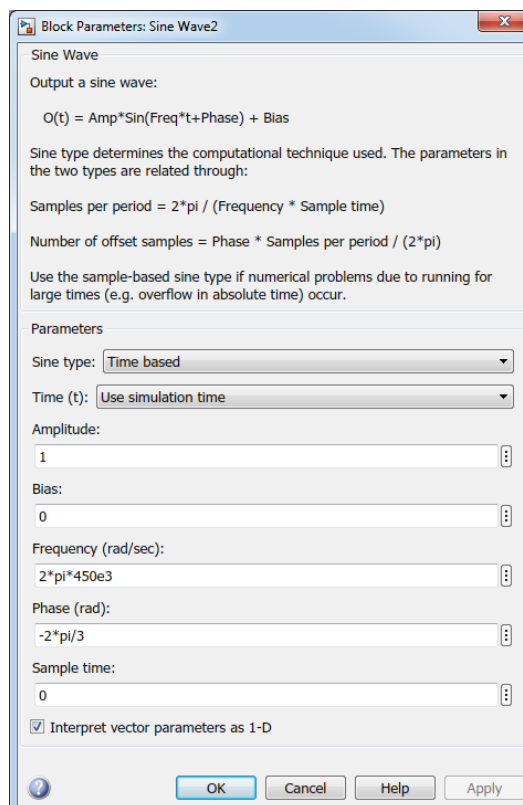
Налаштування всіх блоків системи керування залишаються такими ж як і в трирівневому інверторі, окрім параметрів блоків синусоїди (Sine Wave). Їх параметри зображені на рис. 3.10. Синусоїди зміщені одна відносно іншої по фазі на 120 градусів.



а)



б)



в)

Рис.3.10 Налаштування блоку синусоїди: а) Sine Wave 3, б) Sine Wave 1, в) Sine Wave 2

### 3.4. Вплив активного опору навантаження на роботу зондувального пристрою

В середовищі Matlab Simulink було проведено дослідження впливу зміни активного навантаження на роботу схеми. В результаті були отримані залежності від опору: струму через навантаження ( $I_n$ ), напруги на навантаженні ( $U_n$ ), потужності навантаження ( $P$ ) та струму на виході інвертора ( $I_{inv}$ ). Значення для схеми з трирівневим інвертором занесені до табл.3.1, а для схеми з п'ятирівневим до табл.3.2.

Таблиця 3.1

R/Ri	Ri, Ом	$I_n$ , А	$U_n$ , В	$I_{inv}$ , А	P, Вт
0,4	0,53	25,08533	13,29522	121,375	333,515
0,55	0,73	18,32532	13,37748	121,534	245,146
0,72	0,93	14,43222	13,42196	121,621	193,708
0,85	1,13	11,90242	13,44973	121,675	160,084

					ДС51.510.403.001ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

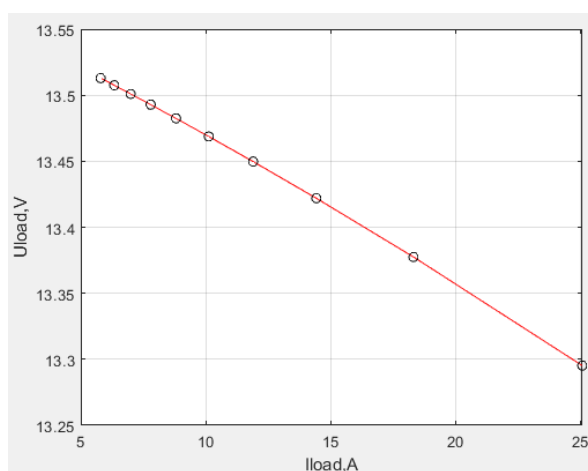
Продовження табл. 3.1

1	1,33	10,12683	13,46868	121,712	136,395
1,15	1,53	8,81204	13,48242	121,739	118,807
1,3	1,73	7,799322	13,49283	-121,76	105,234
1,45	1,93	6,995325	13,50098	121,776	94,4437
1,6	2,13	6,341563	13,50753	121,789	85,6588
1,75.	2,33	5,799532	13,51291	121,799	78,3685

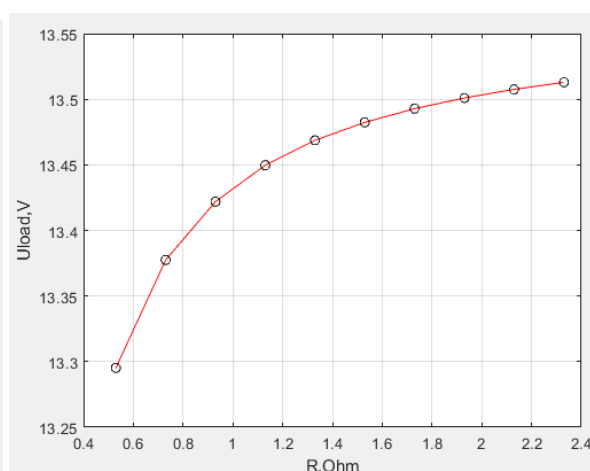
На основі отриманих даних побудовано вольт-амперну характеристику на навантаженні, залежність напруги на навантаженні від активного опору, залежність потужності на навантаженні від активного опору, залежність струму на виході інвертора від опору на навантаженні для трирівневого інвертора (рис.3.11) та п'ятирівневого інвертора (рис.3.12).

Таблиця 3.2

Ri/R	Ri, Ом	I <sub>н</sub> , А	U <sub>н</sub> , В	I <sub>інв</sub> , А	P, Вт
0,4	0,53	19,3926	10,27808	19,78791	199,3187
0,55	0,73	14,10844	10,29916	19,75255	145,305
0,72	0,93	11,08598	10,30996	19,73573	114,2961
0,85	1,13	9,130047	10,31695	19,72624	94,19427
1	1,33	7,761017	10,32215	19,72029	80,1104
1,15	1,53	6,749255	10,32636	19,7163	69,69525
1,3	1,73	5,97111	10,33002	19,71345	61,68169
1,45	1,93	5,35413	10,33347	19,71133	55,32675
1,6	2,13	4,853055	10,33701	19,70965	50,16606
1,75.	2,33	4,438146	10,34088	19,70827	45,89434

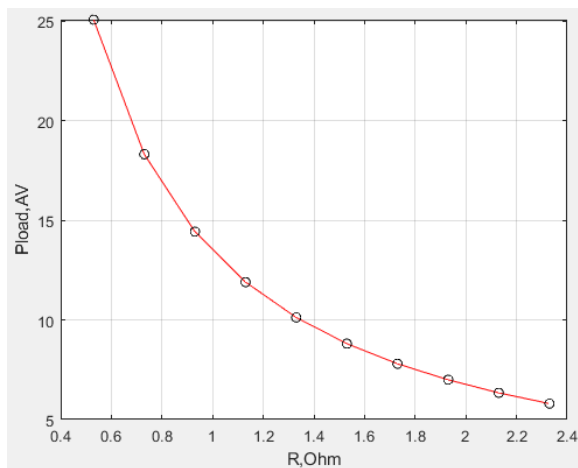


а)

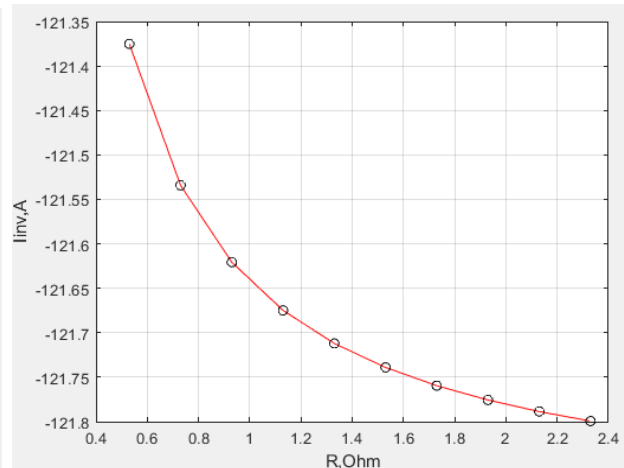


б)





в)



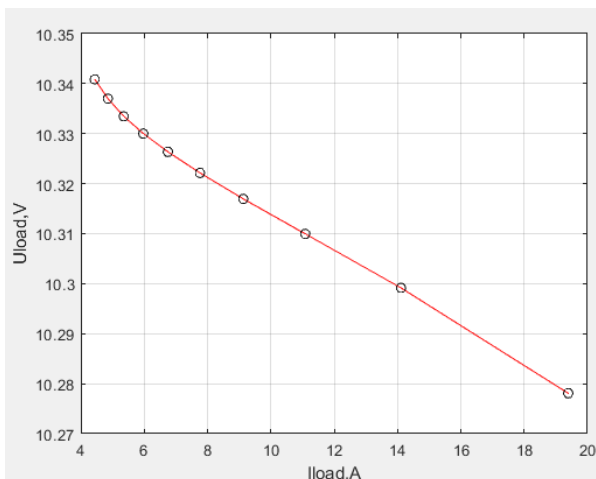
г)

Рис.3.11 Залежності для трирівневого інвертора: а) вольт-амперна характеристика на навантаженні, б) залежність напруги на навантаженні від активного опору, в) залежність потужності на навантаженні від активного опору, г) залежність струму на виході інвертора від опору на навантаженні

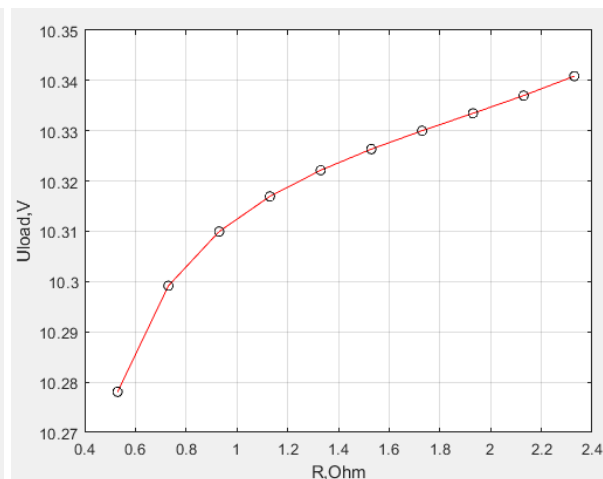
На графіку (рис.3.11 а) видно, що напруга на навантаженні зворотно-пропорційна струму. На рис.3.11 б при збільшенні опору зростає напруга, що відповідає закону Ома.

На графіку (рис.3.11 в) при збільшенні активного опору в навантаженні зменшується потужність, це пояснюється тим, що при збільшенні активного навантаження – зменшується добротність, отже зменшується струм а відповідно і потужність.

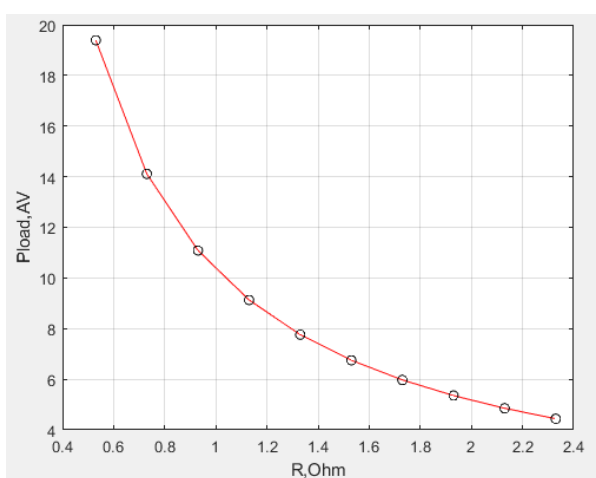
На четвертому графіку зменшується значення струму на виході інвертора зі збільшенням активного опору в навантаженні. Це пояснюється тим, що струм котрий тече через активне навантаження – це згладжений LC-фільтром вихідний струм з інвертора, отже ці струми прямопропорційно залежні, тобто при збільшенні опору в навантаженні, зменшується добротність, тобто зменшується струм через навантаження, отже зменшується і струм на виході інвертора.



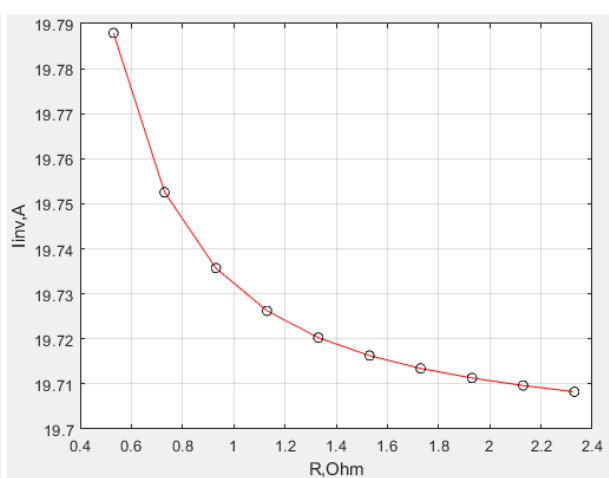
а)



б)



в)

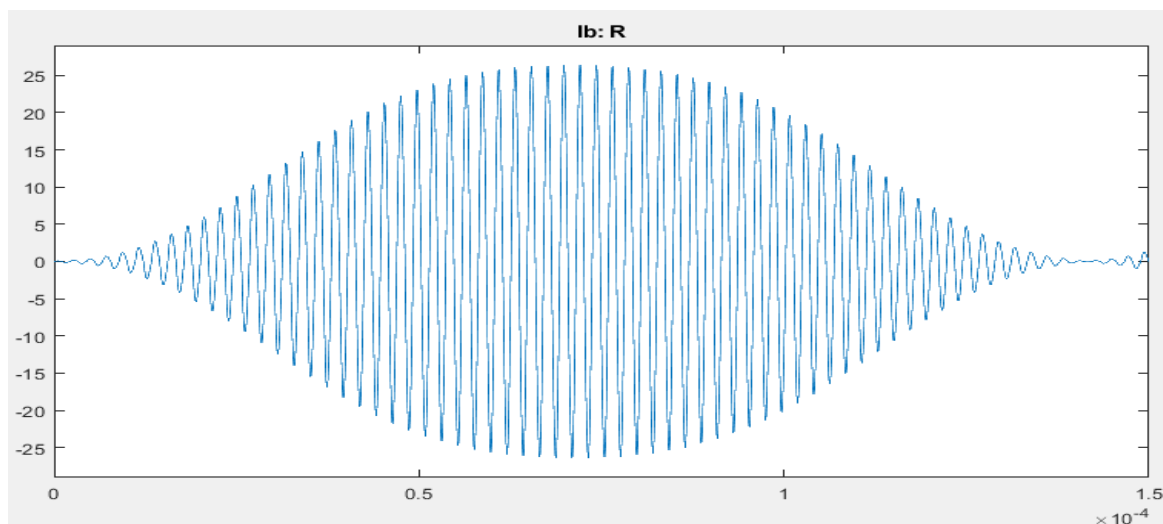


г)

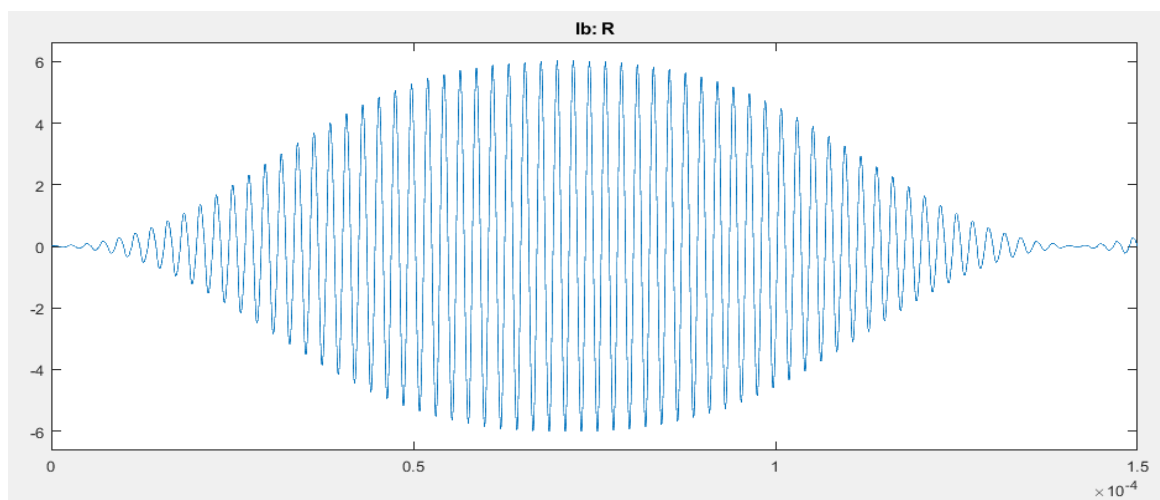
Рис.3.12 а) ВАХ на навантаженні, б) залежність напруги на навантаженні від опору, в) залежність потужності на навантаженні від опору, г) залежність струму через навантаження

Оскільки зондуючі пристрої відрізняються тільки кількістю рівнів напруги, що створюється інверторами, то залежності у схемі з п'ятирівневим інвертором (рис.3.12) такі самі як і у схемі з трирівневим. Проте значення напруг та струмів на виході системи з п'ятирівневим інвертором менше ніж у схемі з трирівневим. Це пояснюється тим, що більша кількість транзисторів зменшує КПД схеми, із-за теплових втрат на них. Також, оскільки в п'ятирівневому інверторі є додатковий конденсатор між зовнішніми транзисторами, то це призводить до додаткових енергетичних втрат, із-за втрат енергії в діелектрику та обкладках конденсатора.

Порівняння зміни струму через навантаження при зміні опору навантаження для трирівневого інвертора зображено на рис 3.13, а для п'ятирівневого на рис 3.14.

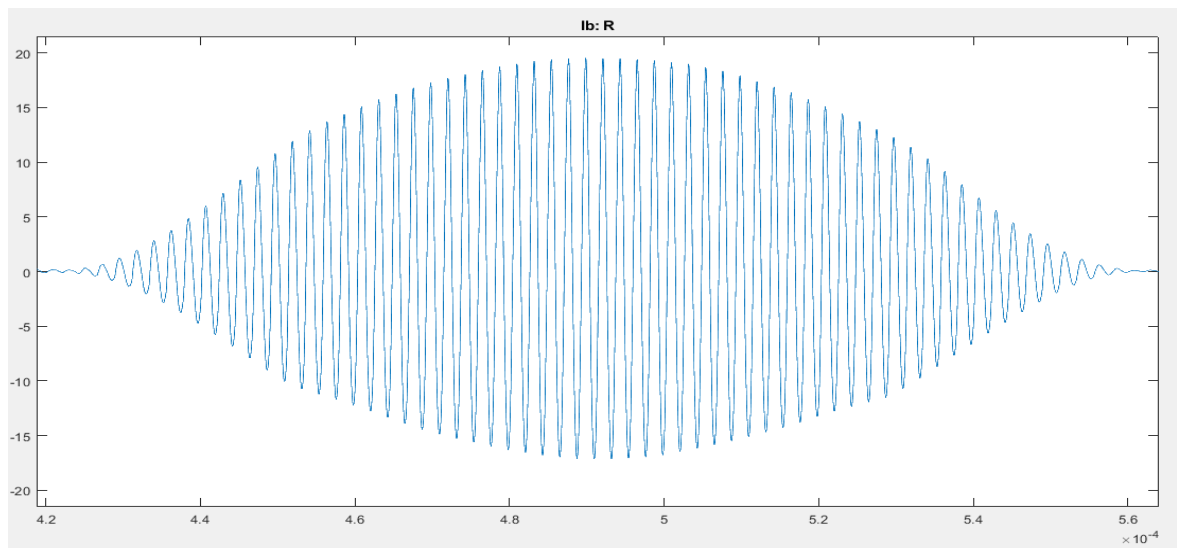


а)

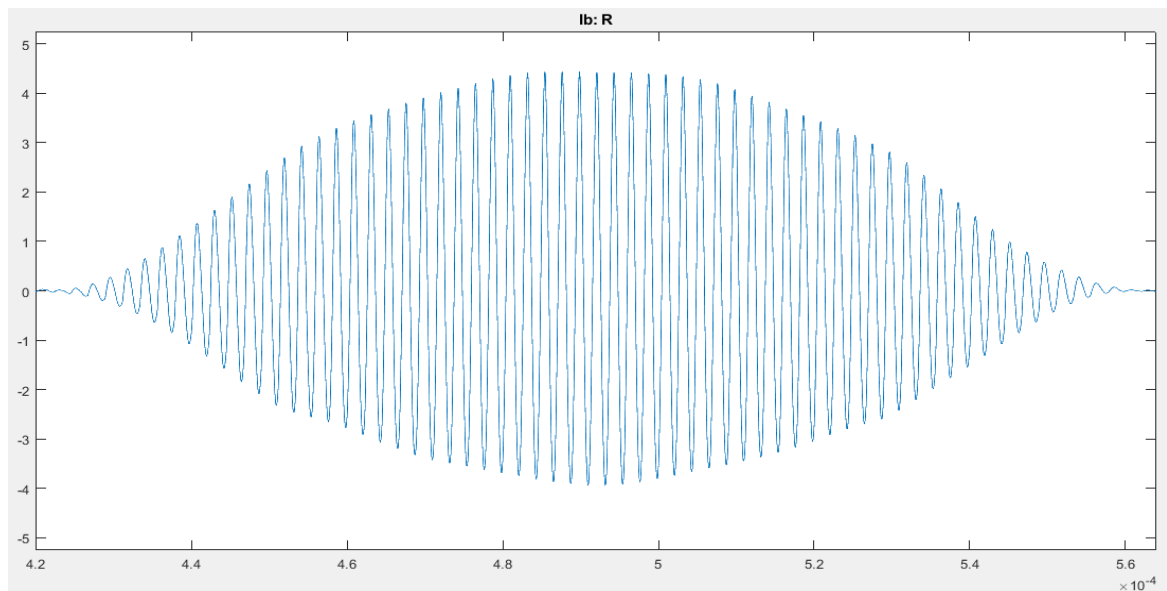


б)

Рис.3.13 а) при 40% від номінального опору, б) при 175%



а)



б)

Рис.3.14 а) при 40% від номінального опору, б) при 175%

### 3.5. Вплив зміни ємності у навантаженні на роботу зондувального пристрою

При роботі з високими струмами та напругами система неодмінно нагріється, що вплине на ємність конденсаторів. Таким чином при нагріві конденсатора від 0 до 80 градусів можливе збільшення його ємності до +20%. Це відбувається тому, що при нагріві відбувається лінійне розширення деталей конденсатора. Дані дослідження впливу зміни ємності в навантаженні на схему

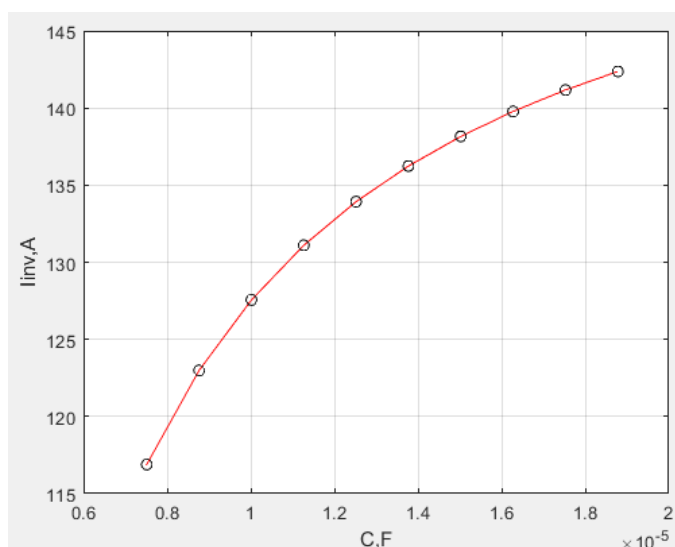
					ДС51.510.403.001ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

для трирівневого інвертора занесено до табл. 3.3, а для п'ятирівневого інвертора до табл. 3.4.

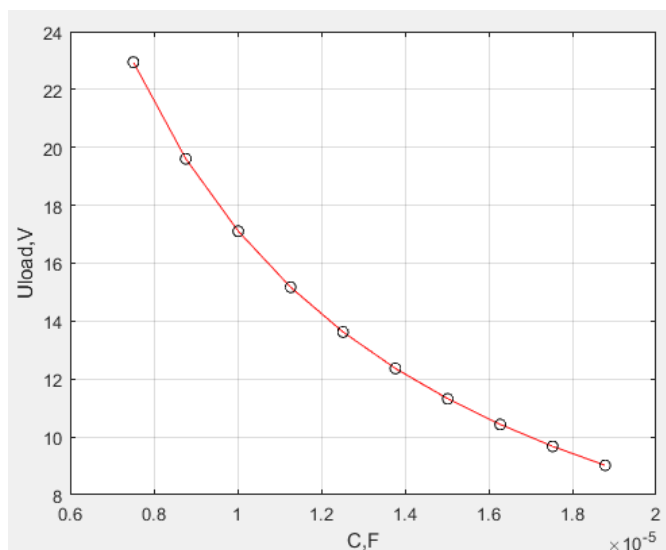
Таблиця 3.3

Ci/C	C, Ф	I <sub>н</sub> , А	U <sub>н</sub> , В	I <sub>інв</sub> , А	P, Вт
1,02	7,51E-06	17,25114	22,94401	116,8857	395,8104
1,04	8,76E-06	14,74117	19,60576	122,9865	289,0119
1,06	1E-05	12,86327	17,10816	127,5544	220,0669
1,08	1,13E-05	11,40668	15,17088	131,0994	173,0493
1,10	1,25E-05	10,24483	13,62562	133,9287	139,5922
1,12	1,38E-05	9,297007	12,36502	136,2385	114,9577
1,14	1,5E-05	8,509232	11,31728	138,1592	96,30136
1,16	1,63E-05	7,844147	10,43272	139,7812	81,83575
1,18	1,75E-05	7,275155	9,675956	141,1691	70,39408
1,20	1,88E-05	6,78285	9,021191	142,3699	61,18938

На основі отриманих даних побудуємо графіки залежності струму на виході трирівневого інвертора (рис.3.15 а) та напруги на навантаженні (рис.3.15 б) від ємності навантаження.



а)



б)

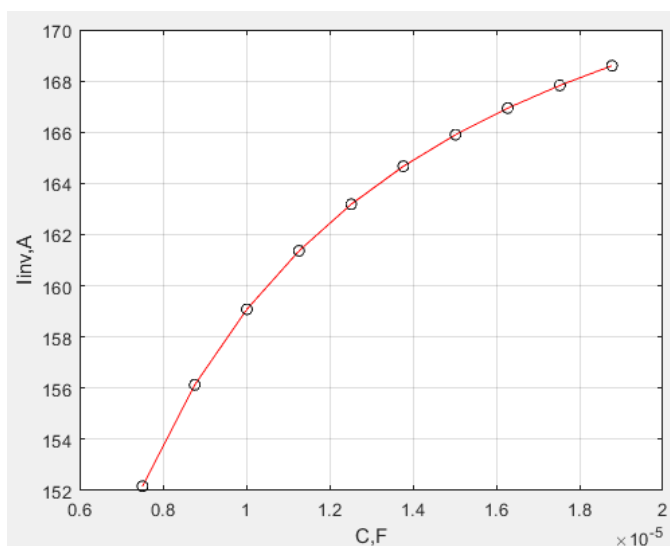
Рис.3.14 а) залежність струму на виході інвертора від ємності в навантаженні,  
б) залежність напруги на навантаженні від ємності в навантаженні

Як видно з графіків на рис.3.14, при зміщенні частоти відносно точки резонансу струмів, напруга буде спадати, а струм збільшуватись.

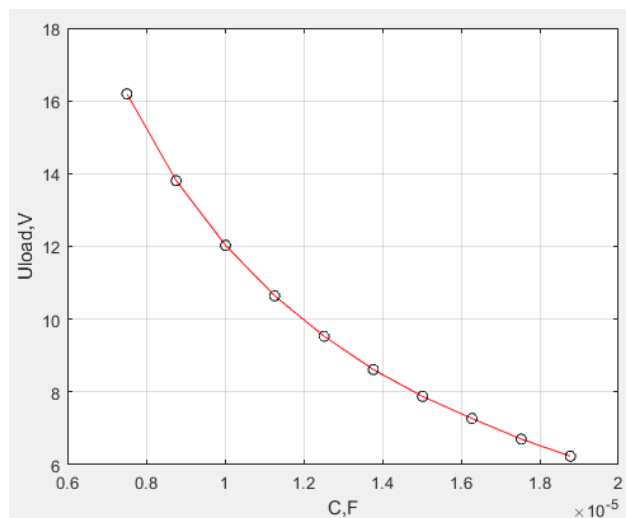
Таблиця 3.4

Ci/C	C, Ф	Iн, А	Uн, В	Iінв, А	P, Вт
0,4	7,51E-06	12,17468	16,19233	152,1689	197,1365
0,55	8,76E-06	10,38178	13,80776	156,1289	143,3491
0,72	1E-05	9,045674	12,03075	159,0816	108,8262
0,85	1,13E-05	7,999401	10,6392	161,3657	85,10724
1	1,25E-05	7,165468	9,530072	163,186	68,28743
1,15	1,38E-05	6,477174	8,614641	164,6693	55,79853
1,3	1,5E-05	5,922236	7,876574	165,903	46,64693
1,45	1,63E-05	5,46773	7,272081	166,9408	39,76178
1,6	1,75E-05	5,03993	6,703107	167,8281	33,78319
1,75.	1,88E-05	4,686417	6,232934	168,5987	29,21013

На основі отриманих даних побудуємо графіки залежності струму на виході п'ятирівневого інвертора (рис.3.15 а) та напруги на навантаженні (рис.3.15 б) від ємності навантаження.



а)



б)

Рис.3.15 а) залежність струму на виході інвертора від ємності в навантаженні,  
б) залежність напруги на навантаженні від ємності в навантаженні

Залежності залишаються такі самі, як і у випадку з трирівневим інвертором, проте вплив ємності на напругу на навантаженні менший в п'ятирівневому інверторі, ніж в трирівневому, адже загальна ємність схеми більша, отже і вплив зміни ємності на навантаженні менш суттєвий.

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

При регулюванні позитивної або негативної складової вихідного сигналу, доцільно використовувати джерело живлення, котре формує окремо додатню напругу для одного плеча інвертора та від'ємну напругу для іншого.

В якості багаторівневого інвертора в силовій частині доцільно використовувати інвертор з плаваючими конденсаторами, адже він дозволяє варіювати комбінації ввімкнення ключів, що дозволяє досягти максимально точного зонduючого сигналу. Також спільна шина постійного струму дозволяє позбутися фазозсувуючого трансформатора, а велика кількість конденсаторів дозволяє працювати з просадками джерела живлення.

В результаті моделювання було досліджено спектральні характеристики систем з трирівневим та п'ятирівневим інвертором, таким чином бічні гармоніки складають 55%, 45% та 53%, 48% відповідно. В результаті можна зробити висновок, що спектральний склад при збільшенні кількості рівнів покращився на 5%. Отже збільшення рівнів в інверторі покращує спектральний склад зонduючої напруги, проте потребує ускладнення системи керування, та збільшення кількості елементів, що підвищує вартість приладу. На основі проведеного аналізу впливу зміни навантаження можна зробити висновок, що схема з п'ятирівневим інвертором більш стійка до зміни температури, за рахунок більшої сумарної ємності схеми. Проте енергетичні втрати в п'ятирівневому інверторі більші, через більшу кількість транзисторів, що призводить до зменшення амплітуди вихідного сигналу, порівняно з трирівневим інвертором.

					ДС51.510.403.001ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. М.А. Таранов, П.Т. Корчагин: Многоуровневые и каскадные инверторы. Вестник аграрной науки Дона. Выпуск 21, 2013.
2. В.Г. Макаров, Р.Н. Хайбрахманов: Многоуровневые инверторы напряжения. Обзор топологий и применение. Вестник технологического университета. 2016. №22.
3. Marian P. Kazmierkowski, Leopoldo G. Franquelo, Jose Rodriguez, Marcelo A. Perez, Jose I. Leon, "High-Performance Motor Drives", IEEE Industrial Electronicsd, vol. 5, no. 3, pp. 6-26, Sep.2011.
4. Rahul Dixit, Bindeshwar Singh, Nupur Mittal. Adjustable speeds drives: Review on different inverter topologies.- Sultanpur, India.:International Journal of Reviews in Computing, 2012.
5. George R. Coates, Lizhi Xiao, And Manfred G. Prammer "NMR LOGGIN principles & applications" pp.17-25,1999.
6. Махно О.О., Семенов В.В., Будьонний О.В., Омельчук Н.А. Автономні перетворювачі. Навчальний посібник., 2009.
7. Заграничний А.В., Рогаль В.В.. Застосування інверторів в пристроях ядерного магнітного резонансу. Технічна електродинаміка № 5, 2014 (вересень/жовтень). – пп.139-141.
8. Герман-Галкин С. Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: Учитель и ученик, КОРОНА принт, 2002. – 304 с.
9. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника: Учебник для вузов/ Под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
10. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М: Гардарики, 2000.
11. Попков О.З. Основы преобразовательной техники: учеб. пособие для вузов/О.З. Попков. 2-е изд., стереот. – М. : Издательский дом МСИ, 2007. – 200 .

					ДС51.510.403.001ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

12. Силовая электроника: Примеры и расчеты/ Ф.Чаки, И.Герман, И.Ипшич и др. Пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1982. – 384с., ил.

13. Вентельные преобразователи переменной структуры/ Тонкаль В.Е., Руденко В.С., Жуйков В.Я., и др.; Отв.ред. Шидловский А.К.; АН УСРР. Ин-т электродинамики. – Киев: Наук. думка, 1989. – 336 с.

14. Гончаров Ю.П., Буденный О.В., Морозов В.Г. Преобразовательная техника. Учебник. Ч2. – Харьков: Фолио, 2000г.

15. А.В. Кудрявцев, Н.В. Лысов : Моделирование инверторов напряжения. Журнал “Известия Петербургского университета путей сообщения”, 2007г.

16. Перетворювальна техніка : Підручник для студ. вищ. навч. закладів, які навчаються за спец. "Промислова електроніка" Ч2 / Ю. П. Гончаров, О. В. Будьонний, В. Г. Морозов, М. В. Панасенко, В. Я. Ромашко, В. С. Руденко. За ред. В.С. Руденка. - Харків : Фоліо, 2000. - 360 с. ил.

17. Енергетична електроніка. Жуйков В.Я., Рогаль В.В., Будьонний О.В., Пілінський В.В. та ін. Київ, 2008. Електронний підручник. [http://www. Kaf-re.kpi.ua](http://www.Kaf-re.kpi.ua) (розділ сайту «Видання кафедри»).

18. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи.-М.: Энергоиздат, 1986.-376 с.: ил

19. Источники питания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник/ Г.С. Найвельт, К.Б. Мазель, Ч.И. Хусаинов и др.; Под ред.. Г.С. Найвельта.-М.: Радио и связь, 1985.-576 с.: ил.

20. Схемотехника устройств на мощных полевых транзисторах: Справочник / В. В. Бачурин, В. Я. Ваксенбург, В. П. Дьяконов и др.; Под ред. В. П. Дьяконова. – М.: Радио и связь, 1994. – 280 с.: ил.

21. Справочник. Березин О.К., Костиков В. Г., Шахнов В. А. Источники электропитания радиэлектронной аппаратуры. – М.: «ТриЛ», 2000. – 400 с.: ил.

22. В.С. Руденко Основы преобразовательной техники : учеб. для студ. вузов по спец. "Промышленная электроника", 1980. - 424 с.

					ДС51.510.403.001ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

23. Руденко В. С., Сенько В. И., Чиженко И. М. Основы преобразовательной техники. – М. :Высшая школа, 1980. – 424с.

24. Иванчук Б. Н., Липман Р. А., Рувинов Б. Я. Тиристорные и магнитные стабилизаторы напряжения. – М. : Энергия, 1968. – 112 с.

25. Методические указания к курсовому проекту «Преобразовательная техника» для студентов заочной формы обучения специальности 0612. Составители: В. И. Сенько, В. М. Скобченко, В. Г. Морозов, К. К. Победат. – Киев: КПИ, 1984. – 64с.

					ДС51.510.403.001ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

					ДС51.510.403.001ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Поз.	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Діоди</u>		
VD1-VD2	Д171-400	2	
	<u>Кварци</u>		
X1	16 МГц	1	
	<u>Конденсатори</u>		
C1,C2,C3,C4,C10	12 мкФ 400В	5	
C5,C6,C8	22 пФ	3	
C7,C9	47 нФ 800В	2	
C11	22 мкФ	1	
	<u>Мікросхеми</u>		
U1	АТМega16	1	
	<u>Резистори</u>		
R1	1,33 Ом	1	
R2,R5	22 Ом	2	
R3,R4	1 Ом	2	
	<u>Транзистори</u>		
Q1-Q4,Q7,Q8	IPP120N20NFD	6	
Q5-Q6	STB18NM80	2	
	<u>Дроселі</u>		
L1	1 мкГн	1	
L2,L3	1 мГн	2	
L4	0,47 мкГн	1	

					ДС51.510.403.001 ПЕ				
Зм	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Володін О.С.			Інвертор напруги з плаваючими конденсаторами Перелік елементів	Літ.		Аркуш	Аркушів
Перевір.		Заграничний А.В.						1	1
Т. контр.						КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ гр. ДС-51			
Н. контр.		Батрак Л.М.							
Затверд.		Заграничний А.В.							

## ABSTRACT

To date, the use of inverters for the transmission of electricity, frequency control of electric motor rotation, solar panels and wind generators, etc., is relevant. Since two-level inverters are based on semiconductor keys, there is a problem with their use with high-voltage systems, because they have a maximum allowable voltage level. To solve this problem, multi-level inverters that can form three or more voltage levels are used to produce a high-quality harmonic signal with a high amplitude. This solution is used by Siemens, ABB, Simovert, for frequency converters, as well as General Electric, Mitsubishi Electric, Robicon for electric drives and wind turbines. These inverters use cheap IGBT transistors as key elements. Powerslide modulation is used to control such inverters, with which a combination of unlocking keys is used to obtain the required signal. Also, one of the areas of use of multi-level inverters is the study of earth crust layers using a logging method based on nuclear magnetic resonance.

With the use of multi-level inverters there are difficulties in the area of active load balancing, optimization of the control system and rational choice of the number of voltage levels in relation to the type of topology that needs research and analysis.

The inverter is a periodic voltage generator, and the voltage form can be sinusoidal, close to sinusoidal or pulsed. Typically, an inverter converts a constant voltage of one value into an alternating voltage of another value. In the converting technique, the inverter converts the voltage by transforming it at a high frequency (tens or hundreds of kilohertz). The inverter consists of semiconductor switches, which are controlled by the controller and usually have back-flow shunt diodes. The voltage at the inverter output is governed by the change in the pulse duration of the control. In the simplest case, this is a change in the width of the PWM pulse.

The first inverters were exclusively mechanical. The principle of their work was that the mechanism, for example, the engine, switched the contacts, changing the polarity of the direct current, thereby forming several levels of voltage. Today,

there are many schemes of inverters on semiconductor keys, and three typical schemes:

- bridge without transformer;
- two-stroke with zero output;
- bridge with transformer.

The scheme of a three-level inverter with floating capacitors is depicted in Fig. 1.1. This is a schematic diagram with a fixed neutral point. The number of capacitors on the DC bus is equal to  $m-1$ , and the number of transistor modules is  $2(m-1)$ , where  $m$  is the number of steps in the output voltage curve. The difference between this scheme is that instead of blocking diodes, floating capacitors are used. When an external transistor is on, the capacitor is charged to the voltage  $V_{dc} / 2$ , ie the supply voltage is divided in half between the capacitor and the closed transistor connected to the opposite pole of the power supply. Thus, the voltage from the condenser is fed to the load phase, or calculated from the voltage of the power supply, and in both cases, the load phase voltage will be  $V_{dc} / 2$ .

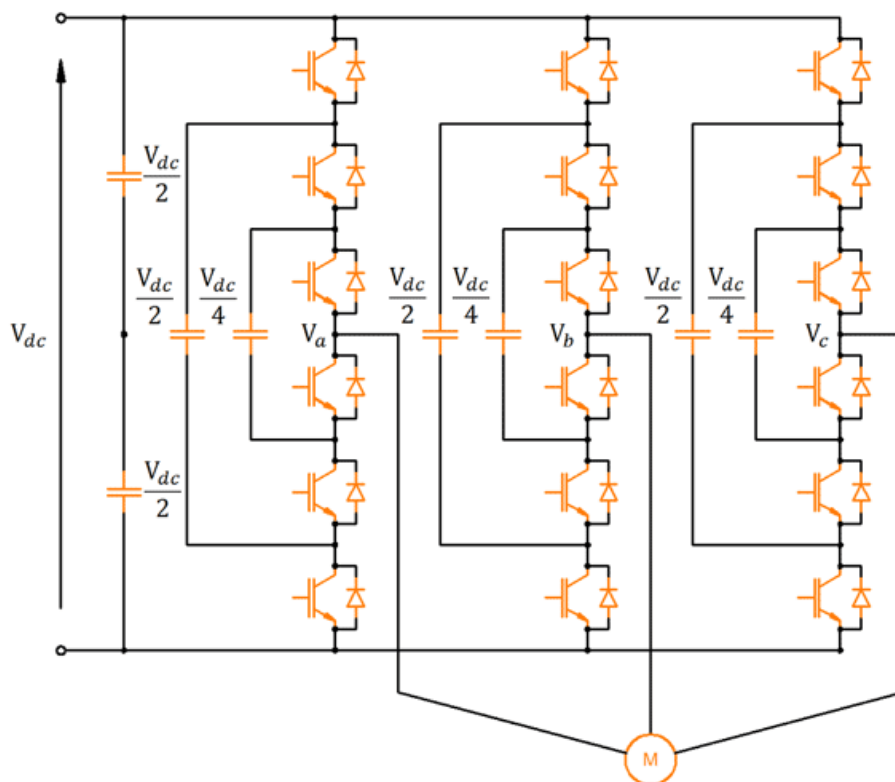


Fig. 1.1 Three-phase inverter with floating capacitors

The advantages of such an inverter are:

- the possibility of balancing the voltage between capacitors on a bus of a direct current at transmission of active power;
- Ability to work with subsidence of the power supply, due to the presence of capacitors;
- increased number of key switch combinations, because capacitors pass back voltage, unlike reverse diodes;
- A common DC bus allows you to get rid of a phase-shifter transformer.

The disadvantages of this scheme are:

- a large number of capacitors, which creates a problem of balancing voltage levels with an increase in the number of output voltage levels;
- the number of capacitors with increasing number of voltage levels increases quadratically;
- Capacitors designed for high voltages have large dimensions.

The nuclear magnetic resonance logging device is a device that uses petrophysical techniques to determine the properties of earth crust in natural conditions. The principle of this device is as follows: a special wave-sounding signal is applied to a powerful magnet, after which an alternating magnetic field is created, the frequency of which is approximately equal to the frequency of the magnetic resonance, which can affect spins of hydrogen atoms, converting the nuclear spin system into a controlled non-equilibrium state. In turn, spin is the kinetic moment of the atom, and since the nucleus of hydrogen is a proton, it creates an electric circle, which in turn creates a magnetic field. After removing the influence of the magnet on the spin system, the relaxation process begins, that is, the return of the spin system to its original state. At the moment of relaxation, the atoms change the magnetic field, which creates a kind of radio signal that is capable of fixing the logging device with a special antenna. After that, the signal is analyzed and a graphical representation of the sections of the earth crust layers is created.



The following pulse radio frequency sequences are available to determine the relaxation time of the spin system: the Khan sequence, the Carr Parsell sequence, the Meybum-Gil-Carr-Parsell sequence, and so on. The best-performing sequence is the Carr Parsell sequence, based on the Khan sequence. The spin system is influenced by a sequence of 90-t-180, that is, by influencing a 90 (180) degree pulse, the magnetization vector deviates by 90 (180) degrees, after which at the time of  $2t$  after the start of the 90-degree pulse, a spin echo is created (Fig. 1.2).

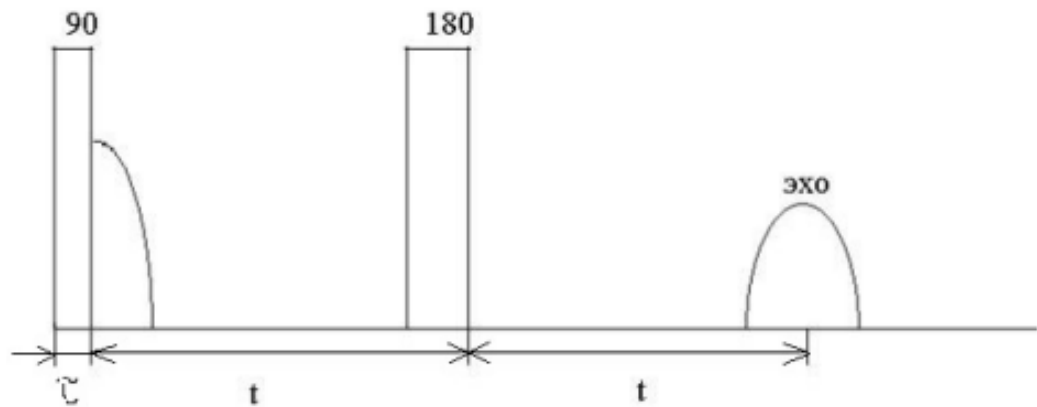


Fig. 1.2 The sequence of Kara-Parcela

To increase the quality of the signal, the magnetic field modulation is used, that is, instead of the rectangular pulse, the signal  $s(t)$  (Fig. 1.3) is used, which is an amplitude modulated by the law  $1 + \cos(t)$ .

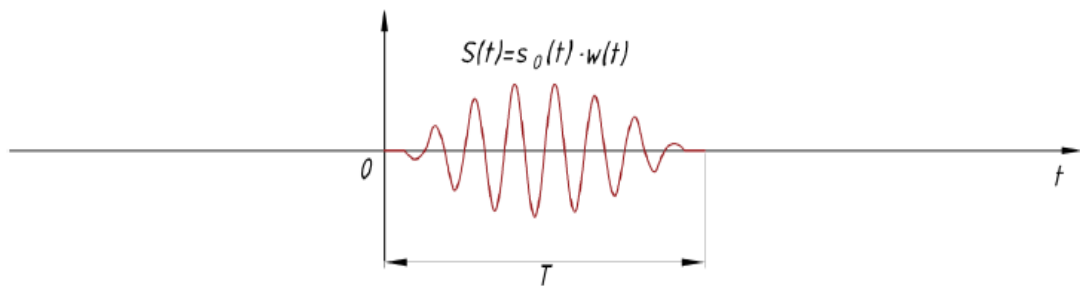


Fig. 1.3 Amplitude modulated signal  $s(t)$

To generate the signal  $s(t)$  can be by means of amplitude-pulse modulation, presenting a signal in the form:

$$s(t) = A_0(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_0 t;$$

$$s(t) = A_0[\cos \omega_0 t + \frac{m}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t + \frac{m}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t],$$

where  $\omega_0$  - carrier frequency, equal to the frequency of magnetic resonance,  $\Omega$  - modulation frequency,  $m$  - modulation coefficient (for modulated Khan sequence),  $A_0$  - amplitude of the signal. To form such a generator, it is necessary to use three generators of sinusoidal voltages while the amplitudes of the lateral harmonics make up 50% of the amplitude of the fundamental harmonic.

In the logging method, it is necessary to form probing impulses with hundreds of watts of power. For this, the key mode of the converter operation is used, that is, it is advisable to use the voltage inverter, and the sounding signal is formed on the basis of pulse-width modulation.